

生鮮農産物の力学的性質とくに果実の 共振振動特性に関する研究

小 島 孝 之

(園芸工学研究室)

昭和57年11月19日受理

Mechanical Properties and Resonant Vibration Characteristics of Fruits

Takayuki KOJIMA

(Laboratory of Food Science and Horticultural Engineering)

Received November 19, 1982

Summary

Mechanical properties of fruits and vegetables are important in many problems associated with design of a specific machine or analysis of the behavior of the product in handling of the material. Therefore, to increase a knowledge of the mechanical properties of fruits and vegetables under various kinds of external forces, plunger penetration, plate compression, plate load cycle, stress relaxation and creep-recovery tests were made and also to estimate non-destructively the interior quality of the fruit, a sonic vibration technique was applied. The results are as follows.

1) Rupture force, rupture energy and rupture deformation of fruits in the plunger penetration test became greater as the diameter of the plunger enlarged. But, penetrating energy per unit contact area, penetrating stress and elastic modulus became smaller as the diameter of the plunger enlarged.

2) Rupture force and elastic modulus showed tendency to enlarge as the compression speed increased, but because of large differences in such as size, weight and shape among the individuals of the agricultural products, the tendency was of no significance in the range of common quasi-static compression speed (4~100 mm/min).

3) The depression of the force-deformation curve or bioyield point did not appear in case of high compression speeds, small diameter of the plungers and some species of the fruits such as the eggplant fruit.

4) There were differences, though they might be not so important, in rupture force even among various parts of the same fruit. And a tendency was observed that the rupture force varied with the species of the fruit, the time of harvest (i.e. ripeness degree) and the conditions of fruit growth.

5) In the plate compression test, it was suggested that the relationship between the applied load and strain recovery ratio was useful to estimate the inner damage of the sample.

6) As regards the mechanical properties of tomatoes during growth, ripening and storage, the rupture force by the plunger continued to decrease, while the amount of the deformation up to the rupture point continued to increase.

- 7) In the sonic vibration test, the resonance frequency of the growing melon shifted gradually to lower frequency range with the thickening and ripening of the melon.
- 8) The resonance points of the melon were also recognized in frequency range higher than 1000 Hz in its growing stage, but not in the ripening stage of the melon fruit.
- 9) The resonance curves of watermelons, tomatoes, apples and Japanese pears were obtained and then the distribution of the resonance vibration strength at the resonance point was measured to make its vibration mode clear.
- 10) Vibration in the frequency of the resonance point of the same sample was found out to be affected by variation of the mass temperature of the sample.
- 11) In a free damping vibration tests by the sonic pulse stimulation, sonic propagating speeds in the flesh of some kinds of fruits were determined by response speeds of the fruits corresponding to the pulse sounds. And by the sonic propagating speed in a fruit flesh, the Young's modulus was calculated. Hence, it became clear that it was possible to know the physical characteristics of the fruit by analyzing the free damping vibration patterns of the fruits.

目 次

第1章 緒 言	3
第2章 既往の研究と基礎的事項	3
第3章 ブランジャ貫入法による果実の力学的性質の測定	9
3.1 材料及び方法	9
3.2 結果及び考察	10
3.2.1 ブランジャ径と力学的性質の関係	10
3.2.2 貫入速度が物性測定値に及ぼす影響	11
3.2.3 若干の農産物に対する外力-変形曲線について	11
第4章 平板圧縮試験法による果実の物性測定について	16
4.1 材料及び方法	16
4.2 結果及び考察	17
4.2.1 ハウスメロンの場合	17
4.2.2 トマトの場合	18
4.2.3 キュウリの場合	19
4.2.4 平板荷重によるクリープ及び復元試験	20
第5章 生育中及び貯蔵中における果実の物性変化	21
5.1 材料及び方法	21
5.2 結果及び考察	22
5.2.1 トマトの生育中及び貯蔵中における力学的性質の変化	22
5.2.2 メロンの生育・成熟及び追熟中における物性変化	25
第6章 果実の共振様式及び共振様相	29
6.1 材料及び方法	30
6.2 結果及び考察	31
6.2.1 最も低い周波数で最初に現われる共振現象	31
6.2.2 リンゴの共振様相と様式	32
6.2.3 ナシの共振様相と様式	34
6.3 総合考察	35
第7章 音波共振用果実支持台の検討	37
7.1 材料及び方法	37
7.2 結果及び考察	38
第8章 果実の共振曲線に及ぼす品温の影響	40
8.1 材料及び方法	40
8.2 実験結果	41
8.3 考 察	45

第9章 果実の共振現象における位相差と物性	48
9.1 材料及び方法	48
9.2 結果及び考察	49
9.2.1 検出器自体の位相遅れ	49
9.2.2 起振方向と位相差	49
9.2.3 果実の大きさ並びに熟度と位相差	49
9.2.4 品種と位相差	50
9.2.5 位相の遅れ速度	51
第10章 パルス法による果実の物性測定	52
10.1 材料及び方法	53
10.2 実験結果	55
10.2.1 音波の果実内伝播速度	55
10.2.2 減衰曲線	55
10.3 考 察	57
10.3.1 ラグタイムについて	57
10.3.2 減衰定数について	58
第11章 総 括	59
謝 辞	62
引用文献	62

第1章 緒 言

農産食品の理工学的性質に関する研究は、最近かなり発表されているが、その測定法などはまだ定まっていない。従って、同一種類の農産物の理工学的性質に関するデータでもかなり異なった値となることが多い。

さらに、この種の研究データは試料の形状、大きさあるいは生育中における細胞生育状態の不均一性による内部的因子が加わり一層均一性に欠ける結果となっている。

しかし、農産物個体の力学的、粘弾性的挙動の実測値はそれらの組織細胞の個々に起こる変位および応力の統計値を考えると非常に信頼性が高く、如何なる理論値よりも正確に農産物の挙動の指針を与えると考えられる。

従って、果実や野菜その他の農産物の理工学的性質を研究し、熟知することは、それらの機械的収穫、選別、調整作業、長期貯蔵、あるいは輸送中における挙動を予測したり、それらの機械装置の設計開発をするうえで極めて重要である。

本論文では、農産物の力学的性質の測定法として簡便で一般的なブランジャ貫入法について、その貫入速度及びブランジャ径の検討、平板圧縮法による物性測定と熟度判定への応用、及びこの分野に音波共振法を導入し、物性面からの品質及び熟度の非破壊測定を試み、後者による物性測定の可能性を明らかにすることを主目的とした。

第2章 既往の研究と基礎的事項

材料の力学的性質に関する研究は、主として工業材料について始まり、行われてきた。したがって、農産物の理工学的性質を工学的見地から研究しようと試みられ始めたのは、比較的新しく、しかも、建築用材を初めとした一般工業材料に対する基礎理論、測定技術の横すべりの応用の感が強かった。

しかしながら、工業材料と大いに異なる生物体としての農産物は、形状及び内部組織構造が非常に複雑で、しかも同一品種においても生育条件等の違いにより物性面でかなりの個体差を伴う。そのため、一貫したデータがとりにくく、農産物の力学的性質に関する測定法もそれぞ

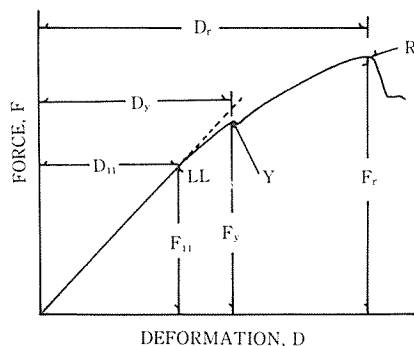


Fig. 2-1 A possible force-deformation curve for an agricultural product. LL, linear limit; Y, "bioyield point"; R, rupture point.

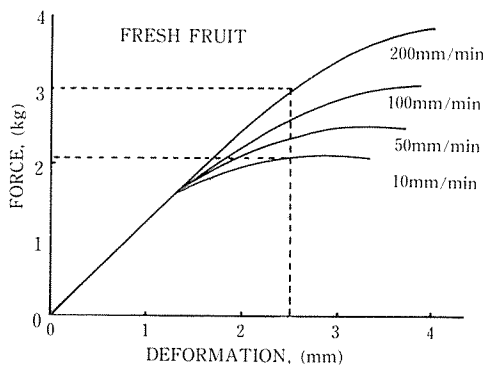


Fig. 2-2 Firmness reading of a fruit can be influenced by the rate of loading.

れの産物に対しそれぞれ適切な方法を考案、適用するほうが実際的である場合が多い。

ここで用いる力学的性質には、いろんな型の荷重、圧縮、引張り、せん断、衝撃を受ける農産物の挙動を含むほか、これらと密接な関連をもつ、重さ、体積、含水率等も重要な測定項目として取扱った。

最も一般的な貫入試験結果は Fig. 2-1 のように示されるが、ほとんどの農産物が外力-変形曲線の初めの部分では弾性的性質を示し、荷重が増大し変形量が大きくなってくると粘弾性的、塑性的性質を示すということは実験的にも明らかにされている^{24,25,26,30,38,42,65)}。農産物は弾性限界を越えると、Fig. 2-2に示すようにその性質は時間依存性となり、レオロジカルな表現が必要になる。

このような複雑な農産物の挙動を把握するために、測定装置の開発、改良が行われてきた。Mohsenin⁴⁴⁾、Pflug⁴⁹⁾、及び Voisey & McDonald⁶⁴⁾は、プランジャによる圧縮試験を行い外力

Tab. 2-1 Relations between textural parameters and popular nomenclature.

MECHANICAL CHARACTERISTICS		
Primary parameters	Secondary parameters	Popular terms
Hardness	Brittleness	Soft.....Firm.....Hard
Cohesiveness		Crumbly.....crunchyBrittle
	Chewiness	Tender.....Chewy.....Tough
	Gumminess	Short.....mealy.....PastyGummy
Viscosity		Thin.....Viscous
Elasticity		Plastic.....Elastic
Adhesiveness		Sticky.....Tacky.....Goosey
GEOMETICAL CHARACTERISTICS		
Class	Examples	
Particle size and shape	Gritty, Grainy, Coarse, etc.	
Particle shape and orientation	Fibrous, Cellular, Crystallin, etc.	
OTHER CHARACTERISTICS		
Primary parameters	Secondary parameters	Popular terms
Moisture content		Dry.....Moist.....WetWatery
Fat content	Oiliness Greasiness	Oily Greasy

Szczesniak (1962)

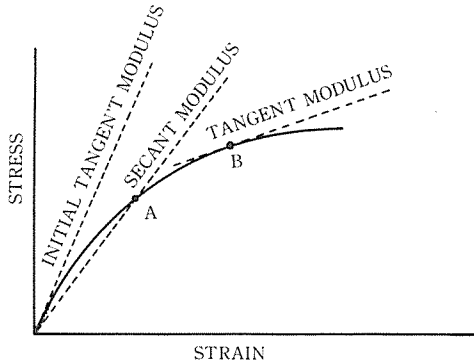


Fig. 2-3 Methods for defining the modulus in non-linear stress-strain diagrams⁴⁵⁾

一変形曲線を得るための装置を研究開発した。Mohsenin はプランジャ貫入試験で得られた外力-変形曲線上の最初の凹みに対し“Bioyield point”という用語を導入し、著者らは、これを生物降伏点と訳して使用している^{26),27)}。

これら先人の研究蓄積の中で農産物のテクスチャを表現する用語としてよく用いられているものは Tab. 2-1 によくまとめられている。

さらに力学的性質に関する基礎的用語について説明を加えると以下のようにまとめることができる。

(1) 弾性限界 (Elastic limit), 外力を受けている試料が、外力を除去されたのちに永久変形を残さずに完全に復元できる範囲の最大応力あるいはひずみ。

(2) 弾性率 (Modulus of elasticity, E), 応力-ひずみ曲線において比例限界以下のひずみに対する応力の比。Fig. 2-3 に示すように応力-ひずみ曲線である場合には、弾性を求める曲線の位置によって次のような用語が用いられる。

- a) Initial tangent modulus, 応力-ひずみ曲線の初期勾配。
- b) Tangent modulus, 応力-ひずみ曲線上の任意の点の接線勾配。
- c) Secant modulus, 応力-ひずみ曲線上の任意の点と原点を結ぶ割線の勾配。
- d) Chord modulus, 応力-ひずみ曲線上に選定した二つの点を結ぶ割線の勾配。

(3) ポアソン比 (Poisson's ratio, μ), 試料にその比例限界以内で垂直に等分布の応力をかける場合、これに相当する垂直方向のひずみに対する横方向のひずみの比。

(4) 比例限界 (Proportional limit), 応力-ひずみ曲線が Hooke's law に従う範囲内の最大応力。

(5) 降伏点 (Yield point, Y), 応力-ひずみ曲線上で応力が増加しないか、または小さくなってひずみだけが增加する最初の点、植物体に対しては生物降伏点 (Bioyield point) と称する (Fig. 2-1)。

(6) 降伏強度 (Yield strength), 応力-ひずみの比例曲線からわずかなずれ (0.2%ひずみ) を示すときの応力。植物体に対しては生物降伏点が明確に表われる場合にはその降伏点の応力、不明確な場合には初期勾配より数%から50%⁴⁵⁾小さい接線勾配の点を生物降伏点とし、その点の応力とする。農産物の種類毎にその率は決定されるべきである。

(7) 破壊点 (Rupture point, R), 外力-変形曲線上において、その供試材料が破壊される瞬間の点 (Fig. 2-1)。

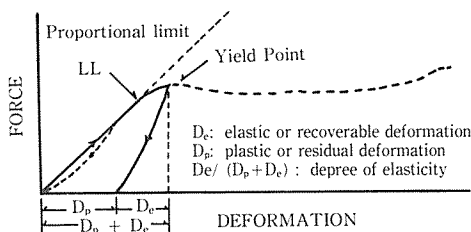


Fig. 2-4 Degree of elasticity from a loading-unloading curve⁴⁵⁾

(8) 弾性 (Elasticity), 物質の変形に対する反力すなわち復元能力。

(9) 塑性 (Plasticity), 物質の塑性すなわち永久変形性。農産物の場合は生物降伏点より大きい変形はほとんど回復不可能であるが、この部分を塑性変形量とする。

(10) 弾性度 (Degree of elasticity), 農産物に荷重をかけ、再びその荷重を除去したとき Fig. 2-4 の実線に示すような曲線を得るが、ここで

全変形量, $D_T (=D_e + D_p)$ に対する弾性変形の比 D_e/D_T として示される。

(11) 吸収エネルギー (Absorbed energy), 物体が外力を受けた場合にその物体の弾性的性質以外の性質により吸収され反発されないエネルギー。例えば, 本報の場合は果実の吸収エネルギーを求めるために平板荷重によるロードサイクルによって得られるヒステリシスループに囲まれた面積から求めた。その説明図を Fig. 2-5 に示す。すなわち, Fig. 2-5 の斜線でマスクした面積 $O-A-B-O$ が吸収エネルギーの大きさを表わすものである。このロードサイクルの荷重範囲は測定対象とする農産物の種類により, 固いものには $0 \sim 5$ kg, やわらかいものにはより小さい $0 \sim 2$ kg あるいは $0 \sim 1$ kg の範囲に適當に設定する必要がある。

(12) やわらかさ (Softness), 外力に対する変形の難易性。すなわち農産物の弾性, 粘性, 塑性的性質を単純に単位荷重 (外力) 当りの変形量 (mm/kg) で表わす。

(13) 応力緩和 (Stress relaxation), 物体に瞬間的に任意の変形量を与え, その変形量を維持し続けると, それに対する応力は時間が経過するとともに緩和し, 減少しつづける。この現象も物質にそれぞれ特性があり, その特性を表現するのに Fig. 2-6 に示すような Maxwell model が用いられ, 次式のように表現される。

すなわち, 時刻 $t=0$ に, 定ひずみ ϵ_0 を与えると, モデルのその瞬間における全応力は,

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \cdots + \sigma_n + \sigma_e \quad \cdots \cdots (2-1)$$

で表わされるが, これは時間とともに減少し,

$$\sigma(t) \epsilon_0 (E d_1 e^{-t/T_1} + E d_2 e^{-t/T_2} + \cdots + E d_n e^{-t/T_n} + E e) \quad \cdots \cdots (2-2)$$

となる。この式中の $T_1, T_2, T_3, \cdots, T_n$ を緩和時間と称し, 初期応力の $1/e$ の割合まで緩和するまでの時間として表わされ, 緩和現象の特性を示すものである。

これらの外に, 農産物のテクスチャと関連している語彙には mealiness, crispness, juiciness などがあるが, とくによく用いられる用語として, かたさ (firmness) と強靱さ (toughness) がある。以下にかたさについて若干の説明をまとめる。

(14) かたさ (Firmness), ほとんどの食品の力学的性質の表現に用いることができ, 次のような仮定に立って客観的に評価できる。

- (i) 農産物に一定の変形量を与えるのに必要な外力
- (ii) 農産物の一定の外力に対する変形量 (やわらかさ)
- (iii) 荷重負荷試験による物体の外力-変形曲線の初期勾配

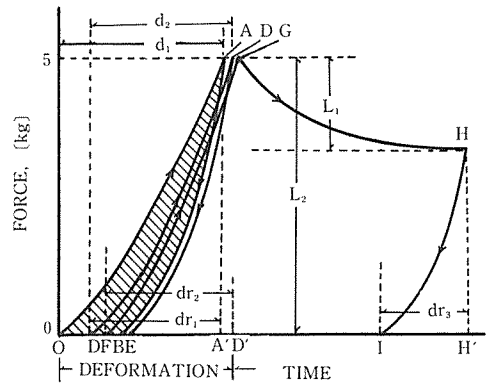


Fig. 2-5 Typical plate compression test curve. This is the force deformation curve of load cycles and the relaxation test showing the following.

properties: Softness, $S_1 = \overline{OA}/5$ (cm)
 Absorbed energy, $E_n = \text{area } O-A-B-O$ (kg-cm)
 Elastic degree, $E_d = dr_1/d_1$ (-)
 Relaxation ratio, $R_r = L_1/L_2$ (-)

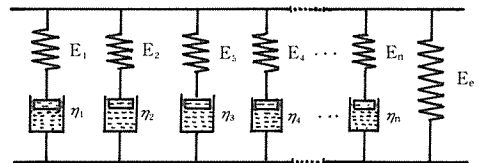


Fig. 2-6 Generalized Maxwell model representation.

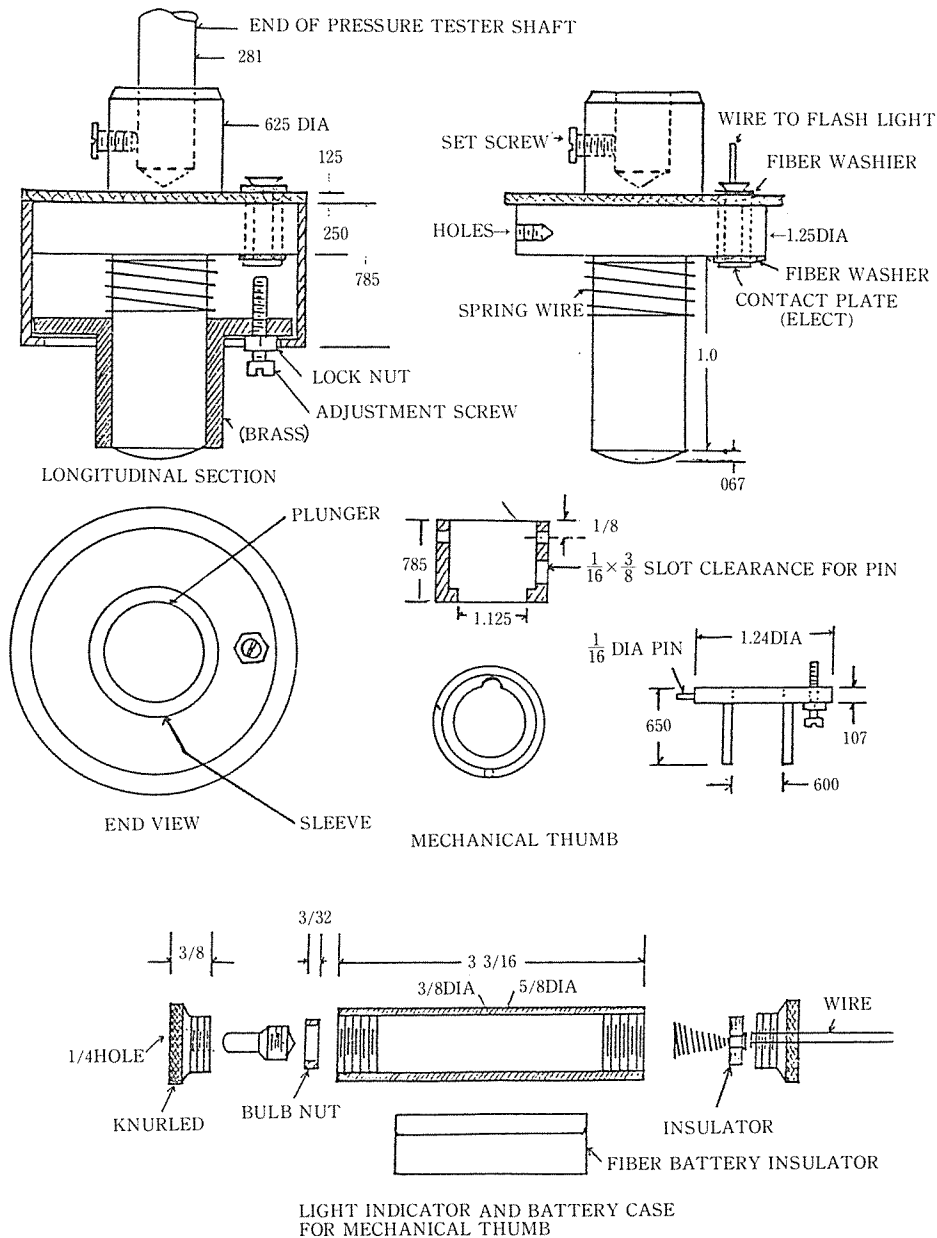


Fig. 2-7 Scale drawing of "mechanical thumb" attachment to Magness-Taylor pressure tester. The dimensions are expressed in inch.

(i)の場合は、大きい外力を必要とするものほどかたさ (firmness) が大である。この仮定を利用したものが Schomer らの果実硬度計 "mechanical thumb" である。Fig. 2-7 に Schomer らの "mechanical thumb" の分解図を示す。

(ii)の場合は、変形量が小さいものほど firmness が大である。(iii)の場合は、外力-変形曲線あるいは応力-ひずみ曲線の初期勾配をとり、基本的には弾性率を表わす。一般には、そのひず

みが1%を越えず、生物降伏点を越えない範囲で測定する。しかしながら、農産物の場合は変形性に富むものが多く、準静的な圧縮あるいは引張り試験の場合は必ずしもこの1%という限界にはとらわれないでよいと考える。

Finney¹⁷⁾は、果実の firmness を果肉貯蔵組織の弾性率であると定義した。植物の組織の弾性率は少なくとも三つの要因に関係している。すなわち、細胞壁の剛直性(rigidity)、細胞間接着剤の硬直性(stiffness)、そして膨圧(turgor pressure)である。例えば、Virgin⁶³⁾、Falk, Somers⁵⁴⁾らは植物体の弾性率の変化は組織内細胞の膨圧の変化に直接関係していることを報告し、含水率が果実・野菜のかたさ(firmness)に著しく影響していることを示した。しかし一方、植物組織の化学成分とその弾性率等の力学的性質との関連については、わずかにプロトペクチンと可溶性ペクチン含量の変化が果実の硬度(hardness)との関連において論じられている⁴³⁾程度で、それらの関係については明らかでない。

(5) 強靱さ(Toughness)、かたさ(firness)が組織細胞の破壊をひきおこさない程度の変形を農産物に与える外力を測定することで求められるのに対し、toughnessの測定には組織構造的に無傷の農産物の組織細胞にある程度の破壊を与える必要がある。すなわち、農産物を破壊するまでに加えられたエネルギーとして表示できる。Fig. 2-8にその説明図を示す。斜線でマスクした部分がtoughnessである。

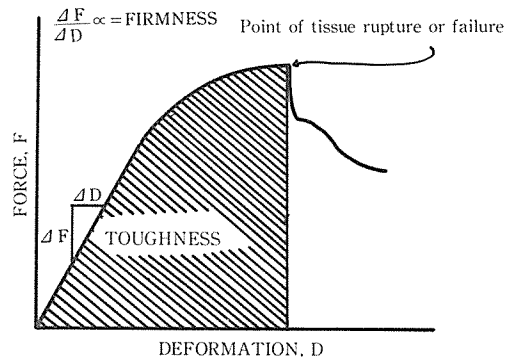


Fig. 2-8 Evaluation firmness and toughness from the force-deformation curve of an agricultural product under uniaxial stress.

強靱さ(toughness)を求めるための試料はサンプリングする農産物、あるいは外力を加える産物上の部位について注意を払う必要がある。応力下の産物がまず破壊するのは、その産物の最も弱い部位である。農産物に構造的欠陥があれば、破壊の生じる位置も不自然なところとなるため正常な農産物のtoughnessを代表しえない。したがって、供試材料には、標準的な農産物あるいは部位をサンプリングしなければならない。

以上に述べた項目は主として準静的な外力を加える方法で測定され、そのほとんどが破壊的手段によって求められることが多い。しかし、最近では農産物の品質、熟度等の評価に非破壊的な検査方法を応用しようとする試みがなされ始めた。農産物の光透過性、光学密度、反射光、あるいはそれらの光質(波長)を利用したもの、クロロフィルの遅延発光を利用したものなどの光学的手段もその例である。

本研究では、非破壊検査の方法として力学的側面から、低域(可聴域)音波による農産物の共振現象を観察し、それらの振動特性を解析する。

工業材料に対しては音波を利用した材質検査法がすでに応用されている。超音波探傷法などもその一つである。この他パルス反射法、透過法、共振法などが利用され、実際に活用されている。しかしながら、これらの方法を複雑な形状、構造をもった農産物に応用した例は少なく、その実用化にいたっては例がない。したがって、農産物の物性、あるいは熟度・品質の非破壊的判定法としての音波共振法の応用実験は極めて興味深く、かつ重要である。

この分野の研究は、早くはClarkとMikelson(1942)が、果実の熟度を評価するために、その果実のやわらかさと果実の振動に対する応答性との相関を求めたものにみられる。最近では、FinneyとNorris(1968)が果実の力学的性質の測定法として、共振法の応用を試みている。ま

た、Abbott ら (1968), Cooke (1970) 及び Finney (1970, 71, 72) は、リンゴ、モモなどの果実のかたさ (firmness) の測定法に共振法を応用して、果実の硬度指数 (stiffness coefficient) を提案し、検討している。さらに、共振法の実用化を目的としたものとして、Stephenson ら (1973) は、トマトの熟果と未熟果を選別する実験的研究を行った。また、中馬ら (1978) は、我国で一般に行われているスイカの打音による熟度判定法の科学性を共振周波数と内部品質との関係で明らかにした。しかしながら、果実の熟度・品質判定法及び選別機構への共振法の応用は技術的にはまだ未解決の問題が多く、今後の研究及び技術的進歩が期待される分野である。

第3章 プランジャ貫入法による果実の力学的性質の測定

穀類あるいは果実などのかたさ、許容応力度、あるいは破壊強度など、それらの力学的性質を知るために、それら産物の径よりかなり小さい直径の円柱鋼棒 (プランジャ) を産物に押し込む方法がよく用いられている。このようなプランジャ貫入試験法によって得られる産物の力学的性質などのデータは、その果実を機械的に取扱う収穫機械や選別・移送装置、あるいは加工処理機械装置などの設計製作においては基礎資料となるものであり、極めて重要な意味をもっている。

しかしながら、プランジャ貫入試験法における貫入速度、プランジャ径などの条件は統一されたものでなく、それらの不統一性が力学的諸性質のデータにどのような影響を及ぼすものか、実験的に確かめたものは無い。

本章では、これらの問題点をふまえながら、数種の農産物の力学的性質を測定した。

3.1 材料および方法

果実の準静的な力学的性質の測定には、東洋ボールドイン製の万能引張試験機、テンシロン UTM-4 L を用いた。Fig. 3-1 に測定に使用した試験機の概略の構成図を示す。

万能引張試験機⑤は実験材料の果実に与える準静的な引張力あるいは圧縮力などの外力をクロスヘッド⑥に装着した接着型抵抗線ひずみ計

を応用したロードセル①によって検出し、この検出された力は X・T 記録計 (SS-7D) ④に記録されるようになっている。また、圧縮あるいは引張方向の変位量もクロスヘッドの動きと連動できる X・T 記録計から読みとることができる。すなわち、記録紙の X 軸にはロードセルで検出した外力が、記録紙送り方向の T 軸にはクロスヘッドの移動距離、つまり試料の変形量が記録される。

X・T 記録計の紙送り速度は 10~1,000mm/min の範囲で可変であるから、試料が変形性に富むやわらかいものか、あるいははもろくて硬いものであるかによって、圧縮速度と紙送り速度の双方を変えることができ、変形量を読みとり易くすることができる。

貫入試験に用いたプランジャは鋼製で、直径が 1, 2, 4, 6, 6.5, 8 および 10mm の円柱型である。

なお、図中の②はクロスヘッドの動き (変位量) を検出する変位検出器、③はその変位量を記録するレコーダで、この場合は別にロードセルに検出される荷重をコントロールする指示計を用いて、定荷重に対する農産物の経時的変形量をみること (クリープ試験) ができる。

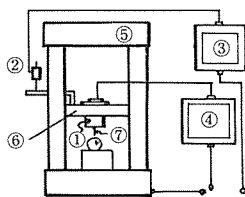


Fig. 3-1 Schematic diagram of the measurement instrument:

- | | |
|------------------------------|-------------------------------------|
| ① Load transducer (cell) | ④ Recorder |
| ② Linear variable transducer | ⑤ Universal testing machine (UTM-4) |
| ③ Recorder | ⑥ Cross head |
| | ⑦ Plunger |

3.2 結果および考察

3.2.1 プランジャ径と力学的性質の関係

果実に貫入させるプランジャの直径が大きくなると当然貫入抵抗が増大する。

Fig. 3-2 はプランジャの太さを変数として行った貫入試験結果である。Fig. 3-2 をみると、その外力-変形曲線の貫入点 (rupture point, ○印) はもとより、その点に至るまでの曲線勾配もプランジャ径が大となるに従って大きくなっている。また、その同一曲線上の勾配も一定でなくなり、変位が増大するとともに勾配も増大していく傾向はプランジャ径が大きくなるほど顕著となるようであった。

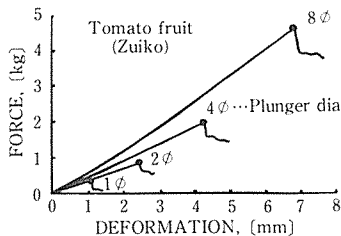


Fig. 3-2 Difference of the force-deformation curves of tomato fruits with the diameter of steel plungers.

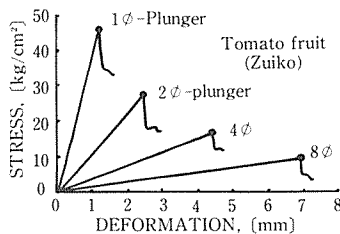


Fig. 3-3 Difference of the stress-deformation curves of tomato fruits with the diameter of steel plungers.

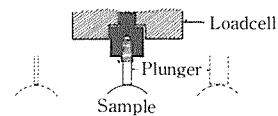


Fig. 3-4 Diagram of Plunger test explain the relations between plunger and sample.

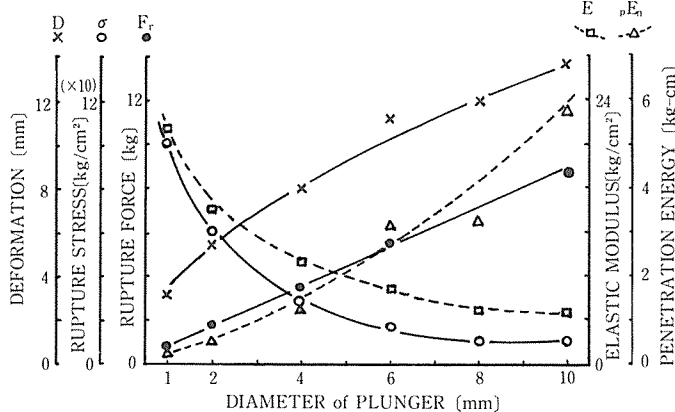


Fig. 3-5 Relationship between the diameter of plunger and the measured values of the mechanical properties of satsuma mandarin (green ripe stage): plunger speed, 10mm/min; moisture content, 82.2% WB; test portion, equatorial part.

説明図を示す。

Fig. 3-5 は同一農産物に対する物性測定値もプランジャの大きさによって異なってくるという実測例を示したものである。

プランジャ直径が大きくなると、果実表面とプランジャ加圧面との接触面積が大きくなるため貫入力、変形量なども大きくなる。

逆に、プランジャ接触面の貫入応力はプランジャ径が大きくなるに従い小さくなる。これら

したがって、かたさを表現するのに単純に貫入力を入点までの変形量で除して求めるには多少の誤差を覚悟しなければならない。また、Fig. 3-3 に示すように、プランジャ断面積当りの力 (応力) で示すと、プランジャと果実表面との実際の接触面積がプランジャ断面積と必ずしも一致しないため、プランジャ径が小さいほど大となる傾向がみられる。したがって、この種の試験においては、プランジャ径を統一して行う必要がある。Fig. 3-4 にプランジャと果実表面の曲率との関係における

のデータを基にして以下に示す式により弾性率 E (□印) も算出し、同図中に示している。

$$E = \frac{F}{D} \cdot \frac{(1-\mu^2)}{2a} \quad \dots\dots\dots (3-1)$$

E : 弾性率 (kg/cm^2), F : 外力 (kg), D : 変形量 (cm),
 a : プランジャ半径 (cm), μ : ポアソン比 (0, あるいは0.5を仮定)

この弾性率 E もプランジャ径が大きくなるに従い指数関数的に小さくなっている。これは、果実が曲率を伴う球体であること、及びプランジャ接触面がプランジャ断面積と等しくなるときの果実の変形状態も果実の大きさにより異なり、弾性域を越えている場合もあることなどに起因すると考えられる。

プランジャ径が8mm及び10mm近辺になると Fig. 3-5 でみられるように比較的lowく安定した弾性率, 貫入応力の値を示してくるが, これはプランジャ径が大きいほどより平板圧縮による測定条件に近づくためである。

逆にプランジャ径が小さくなってくると, より果皮直下のより浅い果肉域と果皮のせん断力を測定することになり, 貫入応力及び弾性率が大きくなる。これはより大きな割合で果皮のせん断力がプランジャに加わってくるためである。

したがって, プランジャ径の大きさを決めるに際しては, 果実の大きさ (曲率) が大きな因子となるが, 果肉のどの程度の深さまでの反力を測定するかが重要なファクタとなってくる。これはもちろん果実の種類によって決定されるべきである。

3.2.2 貫入速度が物性測定値に及ぼす影響

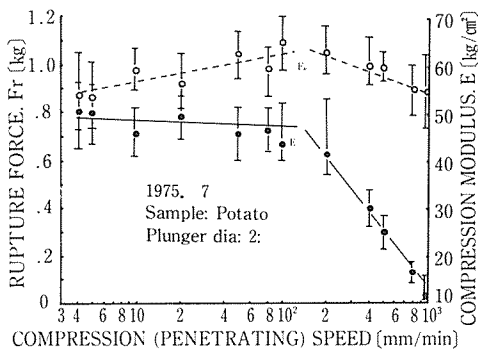


Fig. 3-6 Relationship of rupture force and elastic modulus to compression speed.

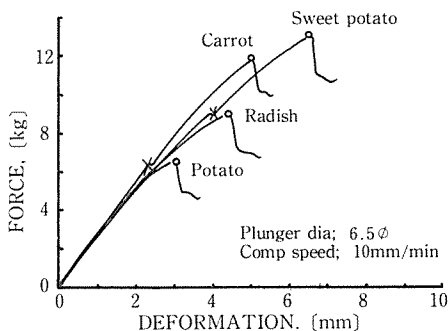


Fig. 3-7 Force-deformation curves for some agricultural products.

収穫後1週間から2週間のバレイショを用い貫入速度と貫入力, 弾性率の関係を調べた。

使用したプランジャの直径は2mm, 貫入速度は4mm/min から1,000mm/min の範囲で設定し, 各段階の貫入速度に対する外力-変形曲線から貫入力を求め, 式 (3-1) により弾性率を算出した。その結果を Fig. 3-6 に示す。

バレイショに対する2mm径プランジャの貫入試験は貫入速度により若干の変動をその物性測定値に与えたが, 一般に適用している速度範囲の準静的な試験においては, その影響による変動において有意な差は認められなかった。

また, 図に示されるように, 貫入速度が大きくなるに従い200mm/min 以上の速度範囲で圧縮弾性率の低下傾向がみられた。

3.2.3 若干の農産物に対する外力-変形曲線について

一般に地中に生育する塊茎または塊根農産物は比較的固く均質であるものが多い。地中生育農産物の代表的なものに対するプランジャ貫入試験例を Fig. 3-7 に示す。

曲線上の×印点はプランジャ圧縮によって内部組織細胞が損傷を受けた生物降伏点であり,

○印点は破壊（貫入）点である。

農産物の種類によっては、生物降伏点が全く観察されず、また同一産物でもプランジャの貫入速度、プランジャ直径、産物の成熟状態などの条件で生物降伏点が外力-変形曲線上に明確に現われる場合と現われない場合とがある。

例えば、外皮が比較的強靱で果肉組織が柔軟性に富むナスなどでは、Fig. 3-8に示すような外力-変形曲線を示して降伏点は現われない。また、プランジャ径が小さすぎる場合にも降伏点が現われない場合が多い。Fig. 3-9~16はそれぞれ柿（次郎、横野、富有、平種無し）、モモ（白鳳）、リンゴ（国光、紅玉、インド）、ナシ（20世紀）、キュウリ（四葉、久留米H）、トマト（福寿2号など）に対する外力-変形曲線である。

それぞれの果実に対する外力-変形曲線の特徴をみると、例えば先にFig. 3-8に示したナスの場合、初期勾配はゆるやかであるが変形が増大するにしたがって、その勾配は大きくなり、急激に破壊している。また、収穫時期及び果実の部位によっても外力-変形曲線上の破壊点あるいはその勾配（かたさ）に差異がみられた。

柿の場合、プランジャ径6.5mmで比較的明確な生物降伏点が現われた。Fig. 3-9に実測例を示したが、品種の違いによりかなりの差異がみられる。果実の状態はいずれも可食段階であったが、この他生育条件、収穫期、熟度など厳密には同じでないため、完全な比較データとはいえない。又、Fig. 3-10に示すように柿の場合も部位により強度に差異がみられ、果頂部が果底部よりやわらかい傾向がみられた。

Fig. 3-11からFig. 3-13にモモのプランジャによる貫入曲線を示した。

モモ（品種白鳳、山梨産）の場合、柿とは逆に果底部が最も抵抗力が小さい。実験に供したモモは、収穫後トラック輸送40時間を含む約50時間経過のものである。

Fig. 3-11は部位別の強度を測定したものである。測定部位は同図中に示しているが、モモの割線（suture）に沿い、果実を二分して考えて、果肉が大きく、色づきのよい側が表側、その反対の方を裏側とすると、表側、裏側ともに果頂部位が最も硬く、次いで果腹部、果底部の順にやわらかくなっていく。

表側と裏側とを比較すると相対的に表側がやわらかい。熟度は果底部から果頂部へ、表側か

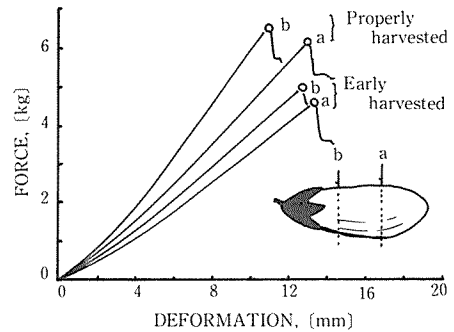


Fig. 3-8 Force-deformation curves for egg plants.

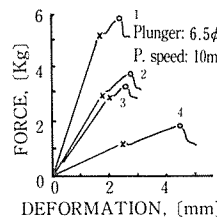


Fig. 3-9 Force-deformation curves of J. persimon, kaki, on the apex: 1, Jiroh; 2, Yokono; 3, Fuyu; 4, Hiratanenashi.

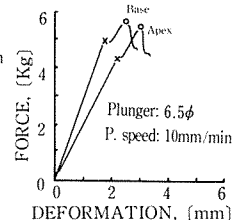


Fig. 3-10 Force-deformation curves of the Jiroh-on the different portions; base and apex.

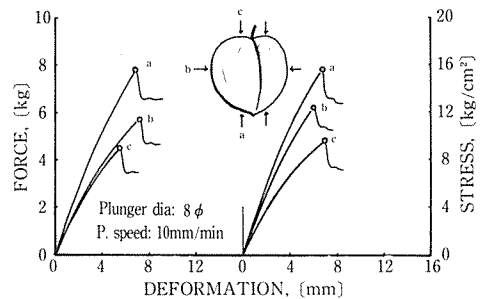


Fig. 3-11 Force-deformation curves of peach (cultivar hakuhoh), 50hrs after harvest.

ら裏側へ進行していると考えられる。

Fig. 3-12 はモモが収穫されて消費地までトラック輸送されたのち、さらに2～5日間の貯蔵を行ったものについての応力-変形曲線である。Fig. 3-12の左側の図は室温 $3 \pm 2^\circ\text{C}$ で貯蔵した場合、右側の図は室温 $20 \sim 30^\circ\text{C}$ の常温で貯蔵した場合のモモのプランジャ貫入試験結果である。時間が経過するにつれて冷蔵による鮮度保持効果が明らかとなり、外力変形曲線の初期勾配、変形量と貫入強度などに明確な差異となって表われた。

また、Fig. 3-13 もモモのプランジャ貫入試験結果で、早もぎして常温トラック輸送後さらに常温貯蔵したもの、冷蔵トラック輸送後さらに $3 \pm 2^\circ\text{C}$ で冷蔵を継続したものの外力変形曲線である。適もぎの場合と同様に冷蔵によるたなもち効果が明らかであった。

Fig. 3-14 はリンゴのプランジャ貫入曲線である。これらにはいずれも曲型的な生物降伏点が見られた。この点でプランジャ下の果肉組織細胞が破壊される。このプランジャによる加圧

面下の果肉を垂直に鋭利な刃で切断すると果肉組織に変色（褐変）がみられる。これはすなわち、生物降伏点で果肉組織が挫傷、破壊し細胞壁から出た細胞内容物が細胞間隙に含まれる酸素にさらされ、細胞内容物中の酸化酵素が働き、ある成分たとえばフェノール物質と酵素が反応して褐変色素ができるためである。つまり、

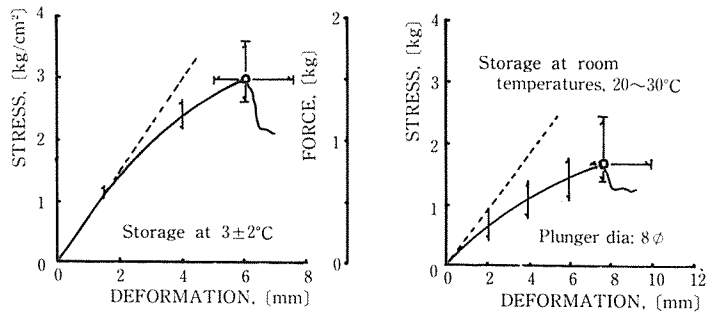
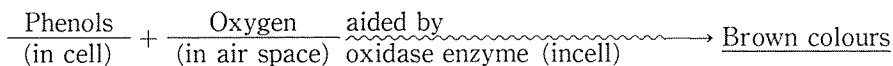


Fig. 3-12 Stress-deformation curves of the peach (HAKUHOH), 4~7 days after harvest.

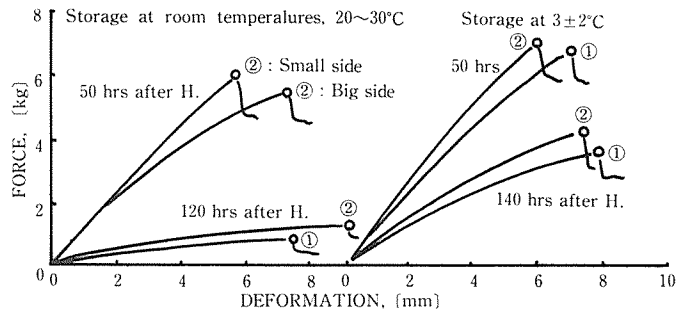


Fig. 3-13 Force-deformation curves of the peach, cultivar Hakuho, early harvested.

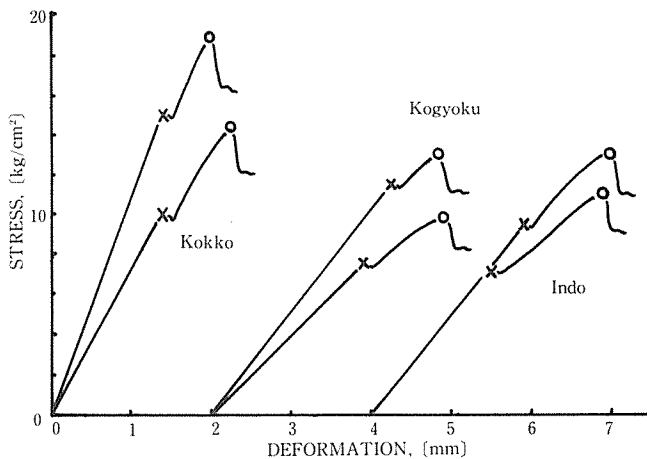


Fig. 3-14 Stress-deformation curves of apple fruits.

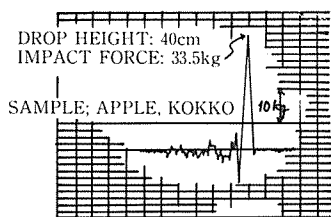


Fig. 3-15 Record example of dropping test for an apple fruit: fruit weight; 189g.

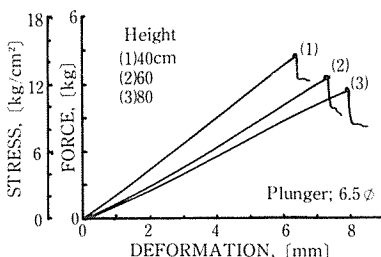


Fig. 3-16 Force-deformation curves on the damaged portion of apples injured by the drop test.

たとえば, Fig. 3-15 のような落下衝撃をリングに与えた場合, その受傷部は褐変し, その変色の深さは落下高さ(衝撃の強さ)に比例して深くなり, 外力に対する果肉の支持力は Fig. 3-16 のように衝撃の大きさに比例して小さくなっている。すなわち, 果実の外力に対する抗力は果肉と果皮が互いに相補完し合っているといえる。

Fig. 3-17 及び Tab. 3-1, 2 は, ハウス栽培キュウリ(久留米H)に対するプランジャ貫入試験結果をまとめたものである。

Fig. 3-17 はキュウリの部位別強度を示しているが, 若干果頂部の方が基部側よりやわらかい傾向にあることがみうけられる。

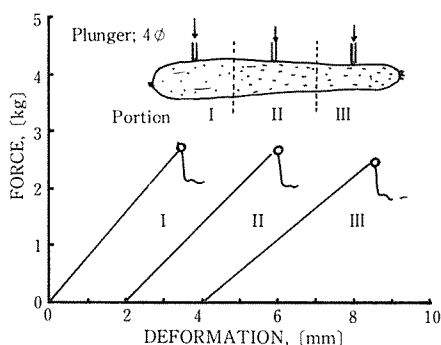


Fig. 3-17 Force-deformation curves of the cucumber, Kurume H.

となる。

降伏点を越えてさらに圧縮を続けると, 破壊(貫入)点に到達する。この点でプランジャは外果皮を突き破り, 果肉内に貫入し, せん断された果皮と挫傷して支持力を失った果肉組織細胞のために急激な反力の減少がみられる。

また, これらプランジャ貫入試験結果より曲線勾配, F/D を求め, 式(3-1)より弾性率 E を算出した。それらの結果をまとめて, Tab. 3-1 および Tab. 3-2 に示す。

Tab. 3-1 は, 直径 4 mm のプランジャを使用し, 果実を 3 等分し, それら等分割された部位の中央部に対して実測したものである。

キュウリの形状は若干果頂部の径が小さくなっている。しかし, 貫入点までの圧縮距離は大きくなり, 貫入強度は小さくなって先端になるほどやわらかいことを示した。貫入エネルギーでみると, 逆に基部が最も小さく, もろ

Tab. 3-1 Summary of penetrating test on cucumbers using 4 ϕ plunger.

Location		1 / 6 from Stem (cv %)		Middle (cv%)		1 / 6 from Apex (cv%)	
Sample dia	cm	2.93	(7.2)	2.74	(2.69)	2.69	(17.4)
Penetrating	cm	0.35	(10.5)	0.42	(12.5)	0.45	(15.6)
Point	kg	2.75	(3.4)	2.70	(6.2)	2.48	(10.6)
Penetrating energy,	kg-cm/cm ²	3.75	(10.4)	4.28	(13.4)	4.19	(26.1)
Elasticity	$\mu=0.0$	23.5		18.8		16.7	
	$\mu=0.5$	17.6	(13.4)	14.1	(13.4)	12.5	(27.7)

Tab. 3-2 Summary of penetrating test on cucumbers using 2 ϕ plunger.

Sample conditions portion		Fresh (at harvest)		Stored (10°C 2weeks)	
		Stem side (cv %)	Apex side (cv %)	Stem side (cv %)	Apex side (cv %)
Sample diameter,	cm	2.54 (6.65)	2.44 (7.97)	2.44 (10.31)	2.23 (12.15)
Penetrating	cm	0.15 (10.0)	0.19 (16.0)	0.26 (18.2)	0.26 (17.24)
Point	kg	1.79 (6.7)	1.58 (11.7)	2.21 (15.9)	1.96 (13.6)
Penetrating energy,	kg-cm/cm ²	4.28 (39.7)	4.77 (34.8)	9.56 (33.1)	8.29 (26.4)
Elasticity kg/cm ²	$\mu=0.0$	30.6	24.8	25.8	22.6
	$\mu=0.5$	23.0 (8.7)	18.6 (10.5)	19.3 (19.3)	16.2 (15.9)

いことを示した。弾性率Eはポアソン比 $\mu=0$ の場合と0.5とした場合の計算結果であるが、基部の弾性率が最も大きく、ついで中央部、果頂部と先端に近いほど小さくなる傾向がみられた。これらの傾向はプランジャ径を2.0mmとした場合も概ね同様であった。

Tab. 3-2は直径2mmのプランジャによるキュウリの貫入試験結果である。Tab. 3-2をプランジャ径4.0mmのTab. 3-1と比較すると、貫入変位及び貫入力が小さくなっているが、貫入エネルギー、弾性率は大きい値となっている。これはプランジャ径が小さいため、比較的強い果皮及びその直下の果肉部の反力を測定していること、径が小さいほど接触面円周域のせん断力はその外力に対してより大きな比を占めることになることなどのためであると考えられる。Tab. 3-2に示すように、10°C貯蔵2週間で貫入力、貫入変位が大きくなり貫入エネルギーが収穫直後より1.7~2.2倍も大きくなり、弾性率も約1割から1.6割も低下していることがわかった。

Fig. 3-18は収穫直後のトマト（福寿2号）の外力-変形曲線を利用してその降伏エネルギー及び破壊エネルギーを図解したものである。

曲線下の生物降伏点までの面積（マスクした部分）が降伏エネルギー、破壊点までの面積が破壊エネルギーである。この方法により果実内部組織に損傷を与えない準静的な外力の機械的エネルギーの上限値の目安が得られる。それはおよそ6mm径の鋼製プランジャでは0.276kg-cmであった。

Fig. 3-19はトマト（ひびき）の部位別の弾性率とプランジャ貫入エネルギーを示したものである。

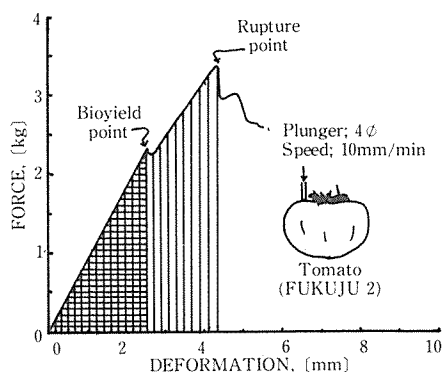
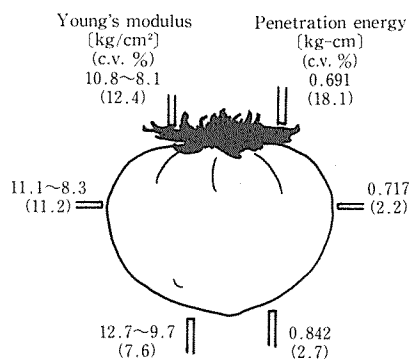


Fig. 3-18 Force-deformation curve of a tomato fruit.

Fig. 3-19 Young's modulus and penetration energy of the tomato (Hibiki) in green mature stage. plunger dia, 4mm ϕ .

農産物を対象とするこの種の測定値は、とくにバラツキが大きく、プランジャ接触面の単位面積当りの応力あるいは単位面積当りの貫入エネルギーなどに変換すると、プランジャ径が小さいものほど大きい値を示す傾向がみられる。したがって、前述のようにプランジャ径は果実の大きさに対して充分小さくしなければならないし、また逆に、プランジャ径が小さすぎると果皮のせん断力のみが大きく貫入力に作用し、果肉のかたさ等の目安となり難いため注意を要する。

従って、プランジャ貫入法を外力に対する果実の抗力測定に利用する場合は、果皮が厚かったり、強靱である果実に対しては、プランジャ径は2mm、あるいは4mmといった小さいものがよく果皮を含む抗力を表わしうる。果実の抗力というより果肉の物性、熟度などの評価に貫入法を応用しようとする場合は、できるだけプランジャの圧力が果肉内部にまで伝達するように、果実の曲率を考慮しながら、かつ初期接触面積がプランジャ断面積と等しい範囲で、プランジャ径は大きい方が望ましい。ここでは一般に4mmから8mmの範囲で決定すべきであることを提唱したい(後述)。

第4章 平板圧縮試験法による果実の物性測定について

収穫された農産物が最もよく受ける外力は農産物の外皮の曲面が互いに相接触する場合、農産物と壁、あるいは床面が相接触する場合の二つの型が考えられる。これらは主として平板による準静的圧縮試験で代表される。したがって、平板で圧縮して農産物の物性を判断する準静的な平板圧縮試験法は、先に論じたプランジャ貫入試験法よりも現実的な試験法で、しかもより実際のデータを得る手段であるとも考えられる。

本章では、鋼製の平行平板の間に果実を圧縮して求めた力学的な物性値(弾性率、やわらかさ、強靱さ、吸収エネルギーなど)について述べる。

4.1 材料及び方法

4.1.1 実験材料、佐賀大学農学部附属農場(佐賀市久保泉町)で栽培中あるいは収穫後のハウスメロン、トマト、キュウリ及び佐賀県農業試験場(佐賀郡川副町)で収穫されたハウスメロンを供試した。

品種はハウスメロンがフカミドリ及びコサック、トマトが東光そしてキュウリが久留米Hである。

4.1.2 測定法、万能引張試験機のクロスヘッドに装着した圧縮型ロードセルに鋼製の円形平板(150φ)を装着し、Fig. 4-1のように果実の側面から一方向のみの圧縮力を与え、その反力をロードセルで検出記録した。

メロン及びトマトに対する平板圧縮の負荷重範囲は0~5kgで、2回から3回のロードサイクルをかけ、これから得られるヒステリシスループ内の面積、圧縮時の外力-変形曲線などから吸収エネルギー、弾性率及びやわらかさなどを求めた。

キュウリの場合は基部、果中央部、果頂部に3分割し、それぞれの側面からクリープ荷重を与えた。さらに、これら3分割した試片を実験法に応じて調製し、円柱型(長さ約4cm)及び

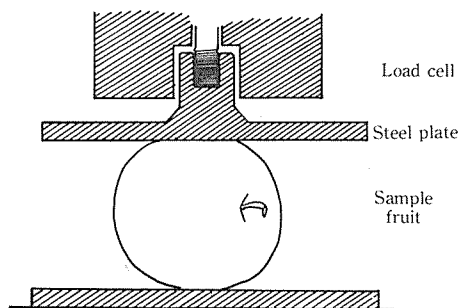


Fig. 4-1 Schematic diagram for the plate compression test of fruits.

種子のある胎座部と果皮部を除いた果肉部を角柱状に成形して供試した。

4.2 結果及び考察

4.2.1 ハウスメロンの場合

メロンの熟度判定は生育中であれば授粉後の日数，あるいは果実の大きさ，色あい，葉色の変化などにより，採取後の果実であれば両手のひらの中で，親指で軽く圧縮し，その圧縮感覚を手のたなごころでとらえる方法などの経験により行われることが多く，難しい問題である。

ここではハウスメロンの追熟過程における物性変化を調べて，力学的性質と熟度の進行状態との関連をみるための基礎的データを求める。

Fig. 4-2 は収穫後のハウスメロン“コサック”の物性変化を平板圧縮法により測定し，これらの物性を総合的に表示したものである。

また，Fig. 4-3 は前者と同時期同条件で貯蔵中のハウスメロン“フカミドリ”の物性変化である。

ここで，弾性率 E_s は Hertz の接触理論を応用して Shpolyanskaya が提案した次式により求めたものである。

$$E_s = \left[1.125(1 - \mu^2)^2 \frac{F^2}{D^3 d} \right]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (4-1)$$

μ : ポアソン比 [—]

F : 平板による圧縮力 [kg]

D : 果実の平均直径 [cm]

d : 圧縮時の果実の変形量 [cm]

ポアソン比 μ は実測困難のため，次のような仮定式をたてて，その計算値を利用した。

$$\mu = \frac{0.5M + 0.1(100 - M)}{100} \quad \dots\dots\dots (4-2)$$

ここで M は含水率である。すなわち，農産物を空隙の多いコルク状細胞群とその空隙あるいは細胞液等の水分量の 2 分質から成ると考え，その両者のポアソン比をそれぞれ 0.1 と 0.5 に仮定して両者の算術和を考えたものである。したがって，水分 100% のときは $\mu = 0.5$ ，水分 0% のと

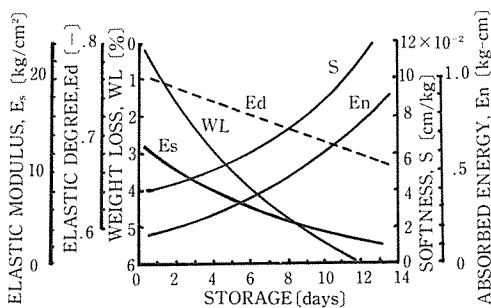


Fig. 4-2 Changes in the physical properties of the netted melon fruit, cultivar Kosakku, during storage at normal room temperatures.

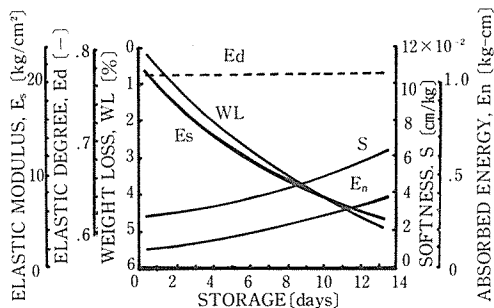


Fig. 4-3 Changes in the physical properties of the netted melon fruit, 'Fukamidori', during storage at normal room temperatures.

Tab. 4-1 Characteristics of the melons, *Cucumis melo* L. cultivar Kosakku and Fukamidori.

Heading	Diameter	Height	Weight	D/H	Density	Thickness		Moisture
Material	D [cm]	H [cm]	W [g]	[-]	ρ [g/cm ³]	of flesh [cm]	Bx	content [% WB]
Kosakku	12.7	13.4	1073.7	0.95	0.93	3.03	12.2	87.3
Fukamidori	12.3	13.8	1150.7	0.89	0.97	2.87	15.5	88.3

きは $\mu=0.1$ (圧縮性は大きくなるが、完全に0とはなりえないと考えた) と仮定したものである。

Tab. 4-1 は供試したハウスメロンの平均的諸特性を示す。

収穫後のハウスメロンに対し、0～5 kgの荷重範囲で平板圧縮によるロードサイクルを与え、これから得られる外力-変形曲線の圧縮時勾配からは式(4-1)による弾性率 E_s 、ヒステリシスループからは吸収エネルギー E_n 、あるいは弾性度 E_d などを求めた。

収穫時のメロンの圧縮弾性率は“コサックメロン”が11～21 kg/cm²、“フカミドリ”が22～30 kg/cm²であった。これが、収穫後10日を経過する頃になると、それぞれ3～9 kg/cm²、及び7～15 kg/cm²まで低下していた。

やわらかさ S は収穫後の10日間で、“コサック”の場合約0.04 cm/kg-plate から0.095 cm/kg-plate、“フカミドリ”の場合は約0.03 cm/kg-plate から0.05 cm/kg-plate と増大した。

0～5 kgの平板圧縮のロードサイクルで吸収される一次吸収エネルギーは“コサック”で収穫直後の $1.4 \sim 2.4 \times 10^{-1}$ kg-cm から10日後には $3.5 \sim 7.3 \times 10^{-1}$ kg-cm と変化した。“フカミドリ”の場合は同期間で $1.0 \sim 1.2 \times 10^{-1}$ kg-cm から $2.5 \sim 2.9 \times 10^{-1}$ kg-cm の変化がみられた。

弾性度をみると、“コサック”は貯蔵2週間で0.76から0.67まで直線的に低下しているが、“フカミドリ”では0.77の収穫直後の弾性度を維持しつづけた。

これらの物性変化はそれぞれの果肉の特性をよく表現し、かつその追熟の速度と食味に密接な関係があると考えられた(次章で詳述)。

4.2.2 トマトの場合

Fig. 4-4 はトマトの平板圧縮ロードサイクル曲線である。図中の曲線(a)は未熟な緑色トマトに対する平板圧縮ロードサイクル曲線、(b)はわずかにうすい緑色が残る程度の熟果に対するロードサイクル、そして(c)は全体的に赤く熟した状態の完熟果についてのロードサイクル曲線である。

これらのデータから、それぞれの熟度における圧縮弾性率を式(4-1)により算出すると、(a)程度の未熟果で23.7 kg/cm²、(b)程度の熟果で14.8 kg/cm²、そして(c)程度の完熟果になると13.4 kg/cm²となった。

またロードサイクルによって得られるヒステリシスループ曲線内面積で示される吸収エネルギーは熟度が進行するにつれて増大した。即ち、曲線(a)、(b)、及び(c)で代表される程度の熟度段階での吸収エネルギーはそれぞれ約0.34 kg-cm、及び1.68 kg-cmであった。

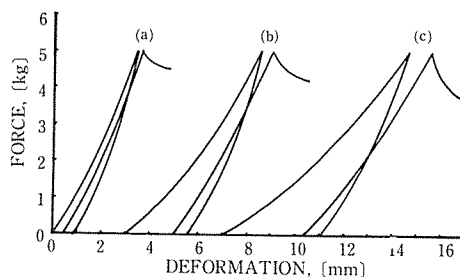


Fig. 4-4 Load-cycle curves of tomato fruits, cultivar Tohkoh, by flat board, (a): immature; (b): properly ripe; (c): completely ripe; the mean dia. of the fruit: 7.4 cm.

以上により、ヒステリシスループは熟度差をかなり適確に表わしうると考えられる。しかし、ループ内の面積測定などは、作業としてかなり煩雑であった。

そこで、この吸収エネルギーと最も相関の強いものを検索したところ、平板圧縮の一回目の圧縮中の外力-変形曲線勾配であることがわかった。吸収エネルギーと外力-変形曲線との関係は指数関係で次のような式で示された。このときの相関係数は-0.727で、危険率2%をみて有意であった。

$$Y = A - X^b \quad \dots\dots\dots (4-3)$$

Y：果実の吸収エネルギー

A：定数

X：加圧曲線勾配

b：指数定数

したがって、式(4-3)の定数を実験的に決定しておけば、各種の果実の加圧曲線勾配から、吸収エネルギーも推定できる。また、果実熟度の良い指標とすることができると考える。

4.2.3 キュウリの場合

収穫直後のキュウリ(久留米H)から、基部(I)、果中部(II)、果頂部(III)に分割し、さらにそれらを約4cmの長さに切断して円柱状に調製したものと、種子のある胎座中心部と果皮を除く均質果肉部を約0.5×0.6×1.0cmの角柱状に成形したものを供試した。

試片は圧縮平板との接触面圧力分布が均一になるように、両端を互いに平行になるよう注意して切断した。

圧縮方向は長軸方向、圧縮速度は10mm/minとした。試片の断面積は上下端面を用紙に写しとり、プランメータ法、重量換算法などにより求め、その平均値をもって決定した。

収穫直後のキュウリの力学的性質をキュウリの基部側(I)、中央部(II)、および果頂部(III)の部位別についてまとめると、Tab.4-2のようになった。

Tab.4-2によると、3部位の全体的な平均toughnessは1.37kg-cm/cm²(c.v.28.9%)であったが、部位別にみると明らかに有意な差がみられ、キュウリは果柄部に近いほどtoughnessが大であることがわかった。

縦方向の圧縮弾性率についても同様に果頂部から果柄部側に移行するに従って大きくなる傾向がみられた。

また、中心部の種子胎座部と果皮部を除く角柱型果肉部についての圧縮試験結果は、Tab.4-3の通りであった。

Tab. 4-2 Result of compression test on the cylindrical test pieces of the cucumber.

Portion	I	II	III	Mean	N
Toughness, kg-cm/cm ²	1.75***	1.35**b	1.02**b	1.37	5
cv, %	6.1	10.0	14.2	28.9	
Elasticity, kg/cm ²	24.7	22.9	21.5	23.0	10
cv, %	10.5	10.0	7.9	4.3	

** a = significantly different from sign ** b at 1 % level.

** b = significantly different from sign *** a at 1 % level.

Tab. 4-3 Result of compression test on the rectangular pillar flesh of the cucumber without rind and seeds portions.

		At Harvest, (cv, %)		At 1 W. after H.	
Cross Area,	[cm ²]	0.28	(10.0)	0.31	(16.8)
Rupture Force	[kg]	3.21	(8.7)	3.55	(24.5)
Rupture Stress	[kg/cm ²]	11.17	(6.7)	11.61	(19.0)
Gradient, F/L	[kg/cm]	9.19	(9.4)	9.43	(17.3)
Elasticity,	[kg/cm ²]	29.03	(12.0)	29.22	(13.6)

Tab. 4-3 は収穫当日のものと、温度10°Cで1週間ポリエチレン袋開封貯蔵したものの測定結果を示している。収穫当日と貯蔵1週間後の測定値間には有異差はみられなかった。キュウリの胎座部及び表皮を除いた均質な果肉部の弾性率は Tab. 4-2 に示した値より大きい値を示しているが、このことはキュウリの組織構造上の強さが、胎座部を包む均質な円管状の果肉部に負うところが大であることを示している。ここで、前章で述べた4φプランジャ及び2φプランジャによる貫入試験結果と対比すると、径の大きい4φの方が果肉全体の強さにより近似し、2φプランジャの方が果皮に近い果肉部の強度に近い値となっていることに注目したい。

4.2.4 平板荷重によるクリープ及び復元試験

キュウリを適当な長さ（約5cm）の円柱型に切断し、短軸（直径）方向から平板により、加圧負荷し、その負荷重を一定に保ちながら時間をおくと、Fig. 4-5 のようなクリープ曲線O-A-Bを得る。曲線O-Aは荷重をかけた瞬間に変形する瞬間弾性変形を示し、曲線A-Bは遅延弾性変形を示す。時刻 t_1 で荷重を除去すると、その瞬間にB-Cだけ変形が回復するが、これを瞬間弾性変形、その後徐々に回復する変形C-Dを遅延弾性変形とみることができる。

農産物の場合、そのほとんどが Fig. 4-5 のDの状態では永久変形を残すが、その大きさは載荷重の大きさとその負荷時間の長さに比例して大きくなる。

Fig. 4-6 は載荷重の大きさを変えて、それぞれの荷重を10分間与えた場合のクリープ曲線と、10分後に荷重を除去した場合の回復曲線の実測例である。縦軸はそれぞれの載荷重に対する変形量を試料直径で除してひずみで表わし、試料にかかる載荷重の大きさは試料長さで除して単位長さ当りの荷重、kg/cm、で表わしている。

Fig. 4-6 において明らかなように、変形回復率と載荷重の大きさとの関係を見ると、これら

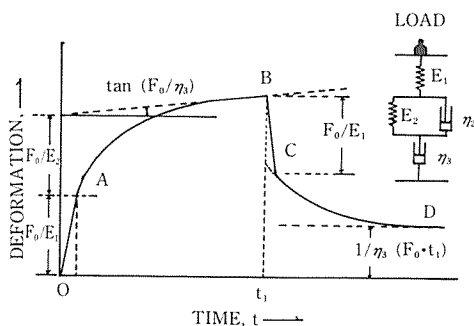


Fig. 4-5 Creep and recovery curve, and the model.

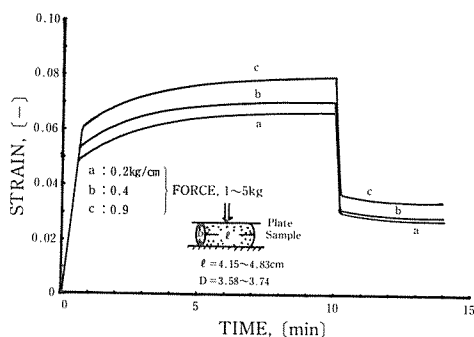


Fig. 4-6 Creep and recovery curves on the cucumber sample, cultivar Kurume Ochiai H.

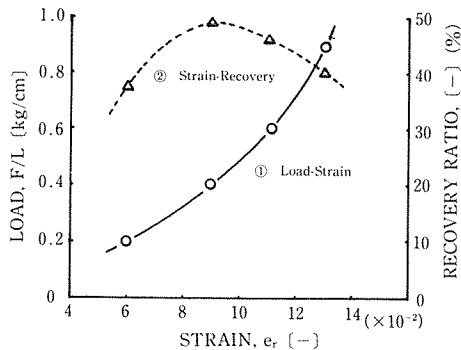


Fig. 4-7 Relationships of 120s-creep load, recovery ratio and total strain, ϵ_r .

大きくなるが、それ以上の変形量に対してはその回復率が次第に低下していくことを示している。このことは、最大回復率を示したひずみ値の0.09以上の変形量を与えると果肉内部組織の破壊が起ると考えられる。したがって、0.09附近のひずみが外力に抗しうるキュウリの限界ひずみであると考えれば、これに対する許容載荷重はキュウリの長さ1cm当り約400gであるとすることができる。

しかし、120秒という短時間の負荷試験で上述のような結論を出すのは、農産物のレオロジカルな性質を考慮した場合、非常に無理がある。したがって、これらの値よりかなり安全側にとった小さい値を限界値と考えるべきである。この載荷重とひずみ、負荷時間の関係についてはより実際のデータを今後蓄積していく必要がある。

第5章 生育中及び貯蔵中における果実の物性変化

果実の力学的性質はその生育・成熟中あるいは収穫後の追熟中にその化学成分の変化とともに著しく変化する。例えば、モモ (Late Elberta) のヤング率は収穫適期3週間前では、 $1925 \times 10^5 \text{ dyn/cm}^2$ であるが、適熟期にはすでに $195 \times 10^5 \text{ dyn/cm}^2$ となっていて、急速な低下を示す。また、ナシのヤング率はこれよりかなり緩やかであるが、生育期間3ヶ月の間に 2884×10^5 から $115 \times 10^5 \text{ dyn/cm}^2$ まで低下している。¹⁶⁾

果実においては、果肉の力学的性質がまたその果実の特性を決定する要因の一つである。ヤング率は固さと同様に果実の組織的性質の主要な測定項目とされ、力学的減衰 (mechanical damping), すなわち内部摩擦の変化は熟度によって変化する果実組織細胞内の粘性変化に関係している。

5.1 材料及び方法

ビニールハウス内で栽培したトマト (福寿2号) 及びガラス温室で栽培したメロン (アールスメロン, 夏系7号) をそれぞれ果実肥大中及び収穫後を通じて供試した。

トマトはその開花結実期後の果実生育中から1週間毎に肥大速度を観察し、準静的なブランジャ貫入試験を中心にその破壊力を測定した。収穫後のトマト果実の常温貯蔵と低温貯蔵 (3~6°C) におき、それぞれの貯蔵中における力学的性質の変化を貫入、クリープ及び復元試験並びに応力緩和試験などによって比較検討した。貫入試験用の鋼性ブランジャは直径6.5mmを用

の間には高い相関 ($r=0.82$) があった。同様に、載荷重の大きさと変形量の間には、 $r=-0.67$, 全変形量と回復率の間には $r=-0.69$ とかなり強い相関があった。

Fig. 4-7 は載荷重の大きさとその負荷時から120秒後における全ひずみの大きさとの関係 (曲線①), 及び載荷重を除去した場合の負荷時のひずみに対する回復ひずみ (ひずみ回復率) の関係 (曲線②) を示したものである。

曲線①は荷重が大きくなるに従いがい、ひずみが増大していることを示している。

また、曲線②は、ひずみがある程度の大きさまでは、その変形量に対する除重後の復元率も

い、クリープ試験用の圧縮平板には150mm径の鋼製円平板を用いた。

メロンは1976年8月17日に定植，9月15日に授粉したもので，測定開始時の果実は総回りが平均28.0cm，赤道緯胴回りが平均27.4cmであった。これが収穫時期には縦回り35.4～39.8cm，平均36.4cm，胴回り34.9@40.5cm，平均36.2cmと肥大していた。収穫は11月8日に行った。このときの果実の重量及び比重量はそれぞれ平均で781.6g及び0.99g/cm³であった。

メロンの物性測定法はトマトの物性測定を準静的な方法で行ったのに対し，非破壊測定の一つである音波共振法を応用した。音波共振法を応用したのは，メロンが高価であるため多量の試料を供試できないため，同一試料の物性変化を非破壊的に追跡するためである。その測定装置の概略図をFig. 5-8に示す。

Fig. 5-8において，果実支持台上に載せた果実に下側果腹部より音圧を与え，上側果腹部上の一定点に加速度型ピックアップ(PV-11A，リオン製)を両面テープで接着し，音圧に対する果実の共振現象を振動計で読みとった。

収穫後のメロンは，直ちに果実重，比重量，共振曲線などを測定した後，15℃及び20℃の温度区に分けて貯蔵した。

貯蔵中の果実は数日毎に共振曲線，目減り，比重量，硬さ，糖度(°B_x)およびパネラによる食味評価を求めた。

5.2 結果及び考察

5.2.1 トマトの生育中及び貯蔵中における力学的性質の変化

生育中のトマトのプランジャ貫入試験結果から興味ある知見が得られた。すなわち，破壊点におけるプランジャの貫入力 F_r は果実の肥大とともに小さくなっていく。この傾向は果実の果頂部，果腹部及び果底部の全部位についても同様であった。Fig. 5-1はその実測結果である。

Fig. 5-2は収穫後の実測結果である。図にみられるように，収穫後においても破壊点までの変形量は増大しつづけ，その点における貫入力は逆に低下しつづけ，生育中と同様の傾向を継続する。

貫入点までの破壊エネルギーは，生育中には次第に増大しつづけ，収穫後は次第に減少しつづけた。すなわち，収穫期頃に破壊エネルギーが最大となることが判明した(Fig. 5-3)。

生育中におけるトマトのプランジャによる破壊エネルギーは10g程度の幼果で1.60kg-

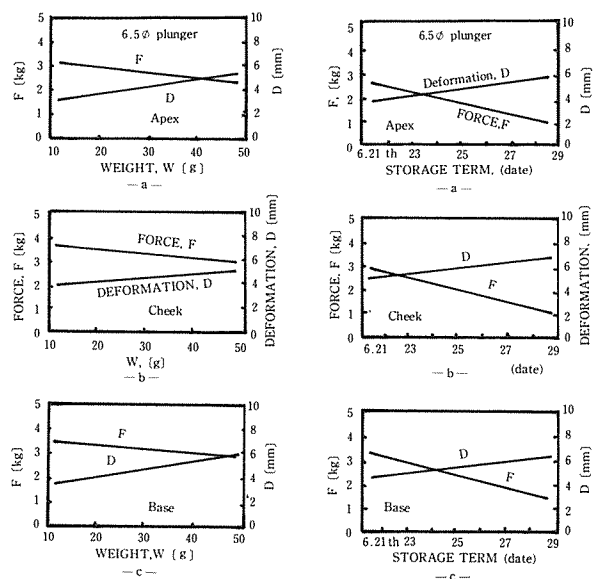


Fig. 5-1 Changes of the rupture point during growing and development of tomato fruits.

Fig. 5-2 Changes of the rupture point of tomato fruits in storage (3~6°C)

cm/cm²を示し、50 g程度に肥大生育すると約2.4kg-cm/cm²に増大した。

逆に、収穫後のトマトの破壊エネルギーは、収穫時前後の2.4kg-cm/cm²から貯蔵中の10日間で約1.90kg-cm/cm²まで低下した。

Fig. 5-4 はトマトの熟果と緑熟果（早もぎ）に対するクリープ及び復元試験結果である。図中の曲線(1)は適もぎの熟果、(2)は早もぎの緑熟果の測定結果である。

早もぎ果は弾性と粘性が共に大きく、5 kg荷重を除去したのち、さらに10分間放置するとほぼ完全に復元した。すなわち、5 kg-10分間の負荷に対して粘性、塑性の頃がかなり大きく、これらの頃の変形が皆無に近かったと考えられる。

これに対し、適もぎ果は5 kg-10分間の負荷に対し変形量が大きくなり、その除重後の復元率は約60%であった。この場合は粘性、塑性がかなり弱くなり、5 kg-10分間で大きく流れて果実の変形に寄与したものであると考えられる。

Fig. 5-5 は青果市場から購入したトマト果実のクリープ曲線である。曲線(1)は常温（18~25℃）5日目、曲線(2)は冷蔵（3~6℃）5日のクリープ及び復元曲線である。採取直後の場合（Fig. 5-4）より熟度が進み、かなり柔らかい状態であったため、そのクリープ荷重は2.5kgに設定した。それにもかかわらず、採取直後と比較するとかなり果実の熟度が進み軟弱化していることおよび採取後の貯蔵温度でかなり追熟老衰速度に差異が生ずることを Fig. 5-5 は示した。

Fig. 5-6 に典型的なクリープ及び復元曲線とそのレオロジカルモデルを示した。図において、準静荷重 F_0 が試料に働いた時間を t_1 、試料の粘性を η_3 とすれば、

$$F_0 \left(\frac{t_1}{\eta_3} \right)$$

で示される残留ひずみ（変形量）が残る。

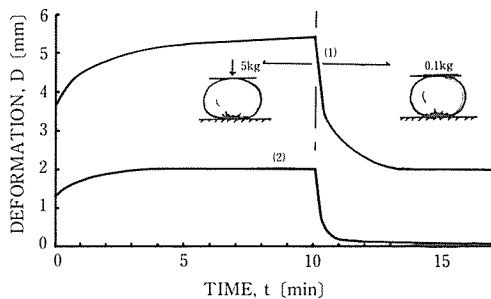


Fig. 5-4 Creep and recovery curves on the apex of the tomato—(1): properly harvested, (2): early harvested—.

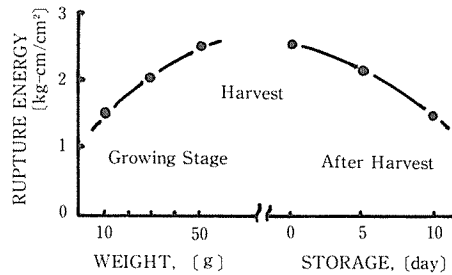


Fig. 5-3 Changes of the rupture energy of tomato fruits by plunger test.

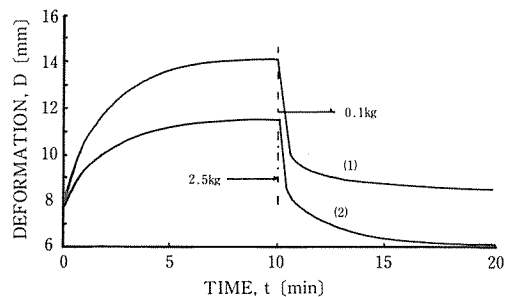


Fig. 5-5 Creep and recovery curves of the cheek of the tomato fruit, cultivar Fukuju No. 2.

(1): storage at normal temperatures, 18~28℃, 5 days.

(2): storage at low temperature, 3~6℃, 5 days.

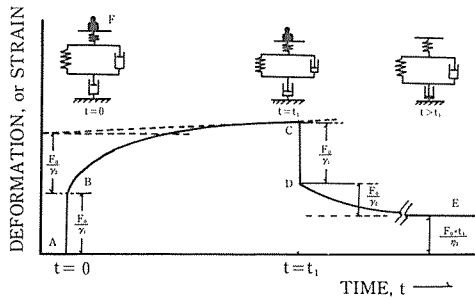


Fig. 5-6 Models for creep and recovery test.

荷重負荷時の変形挙動は一般に次式で示すことができる。

$$D(t) = \frac{F_0}{\gamma_1} + \frac{F_0}{\gamma_2}(1 - e^{-t/T_{ret}}) + \frac{F_0 \cdot t}{\eta_3} \quad (5-1)$$

$$T_{ret} = \eta_2/\gamma_2$$

ここで、 $D(t)$ は時間 t を関数とする変形量、 F_0 は準静荷重、 γ_1 、 γ_2 はバネ弾性率 (kg/cm)、 T_{ret} は遅延時間、 η_2 及び η_3 はダッシュポットの粘性率である。従って、式 (5-1) の右辺第1項は瞬間弾性変形、第2項は遅延弾性変形及び第3項は粘性流動を表わす。

次に、時刻 t_1 で荷重 F_0 を除去すると、バネ γ_1 がただちに F_0/γ_1 だけ回復し (瞬間弾性)、その後フォークト要素が徐々に回復する。しかし、粘性項 η_3 が流れた分 $(F_0 \cdot t_1)/\eta_3$ だけは永久変形として残留する。従って、時刻 $t > t_1$ における回復過程は次式で示される。

$$D(t) = \frac{F_0}{\gamma_2}(1 - e^{-t_1/T_{ret}}) \cdot e^{-(t-t_1)/T_{ret}} + \frac{F_0 \cdot t_1}{\eta_3} \quad (5-2)$$

一方、定変形に対する果実の内部応力及びその応力緩和速度も熟度の進行とともに変化する。Fig. 5-7 は貯蔵7日目の応力緩和曲線を低温貯蔵区と常温貯蔵区のトマトについて実測したものである。図のように定変形 D_0 を産物に与えると、その産物の変形量に対する反力 F は時間 t とともに指数関数的に減少していき、次式のように表わすことができる。

$$F(t) = D_0 \cdot \gamma \cdot e^{-t/T_{ret}} \quad (5-3)$$

しかし、一般に農産物の定変形に対する反力を長時間経過後も維持していることが多い。したがって、式 (5-3) には残留反力を加えることがより一般的となる。

$$F(t) = D_0 \cdot \gamma_1 \cdot e^{-\frac{\gamma_1}{\eta_1} \cdot t_1} + D_0 \cdot \gamma_2 \quad (5-4)$$

また、式 (5-4) は新鮮な未熟果に対しては満足できる場合もあるが、熟果に対しては与えられた変形に対する回復変形量の差 (残留変形) を考慮しなければならない。残留変形量は試料に与えた初期変形 D_0 の大きさ及び D_0 を与えつづけた時間 t_1 に関係し、粘性を示す η_3 などによって表わされる。一方、残留変形のためバネ γ_2 にかかる変形量は初期変形量 D_0 よりその残留変形量分だけ小さくなる。残留変形量を D_{res} とすれば、

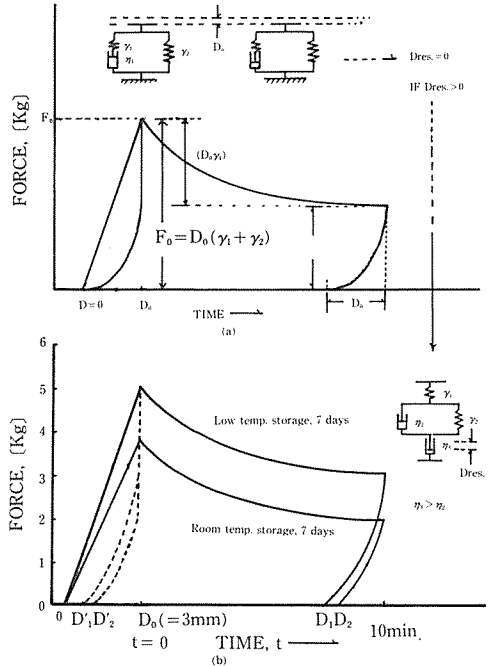


Fig. 5-7 a, b, Relaxation curves and the rheological models, (a) three elements, (b) four elements.

$$D_{res.} = \frac{1}{\eta_3} F(t) \cdot t \quad \dots\dots\dots (5-5)$$

すなわち、4要素モデルのバネ γ_1 及び γ_2 にかかる変形量は $(D_0 - D_{res.})$ であるから、この $D_{res.}$ に式 (5-5) を代入すれば、

$$(D_0 - \frac{1}{\eta_3} F(t) \cdot t)$$

となる。ここで、 $F(t)$ は式 (5-3) と同じであるから、式 (5-4) の右辺第2項は次式のようにになる。

$$\left\{ D_0 - \left(\frac{1}{\eta_3} D_0 \cdot \gamma_1 \cdot e^{-\frac{\gamma_1}{\eta_3} \cdot t} \right) \cdot t \right\} \cdot \gamma_2$$

すなわち、4要素モデルにおける $F(t)$ は、

$$F(t) = D_0 \left[\gamma_1 e^{-\frac{\gamma_1}{\eta_1} \cdot t} + \left\{ 1 - \left(\frac{\gamma_1}{\eta_3} e^{-\frac{\gamma_1}{\eta_3} \cdot t} \right) \cdot t \right\} \cdot \gamma_2 \right] \quad \dots\dots\dots (5-6)$$

ただし、粘性 η_3 は η_2 よりかなり大きいと仮定する。緑熟新鮮果もしくはそれに近い新鮮果実の場合は η_3 が相当に大きいと考えるか、あるいは η_3 のダッシュポットを除いた3要素モデルで表現することができる。

このようにモデルの要素を加えたり、除いたりあるいは要素の係数を変化させることで熟度変化に伴う物性を表現することができる。

5.2.2 メロンの生育・成熟及び追熟中における物性変化

近年高級果菜類の需要はますます増大し、施設園芸を主体とする生産農家もこれに対応して施設園芸の規模拡大と栽培技術の向上に取り組んでいる。消費者側においてはメロンの品質に対する規格化が望まれる。にもかかわらず、これらに関するデータは少ない。例えば、メロンでは品種によってかなり追熟速度が異なることも少なくない。このため、採取後はその供食時期に注意しなければならないが、その決め手となるデータは少ない。

温室で生育中のメロンに対しては、授粉後18日から収穫日まで経時的に縦回り、胴回り及びその果実の共振曲線をその場で測定した。

共振曲線は Fig. 5-8 に示すような方法で求めた。ここで、果実支持台によっては共振曲線にかなりの影響を与えることが判明したが、本実験で使用した果実支持台では共振点測定には問

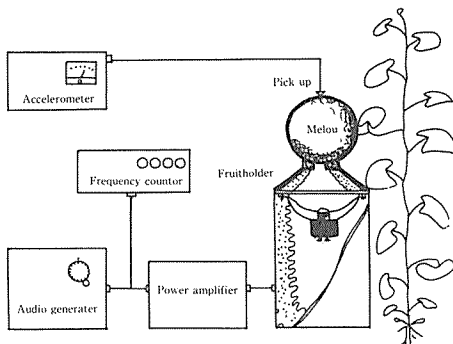


Fig. 5-8 Diagrammatic sketch of the setup used for measurement of dynamic resonance of a melon fruit.

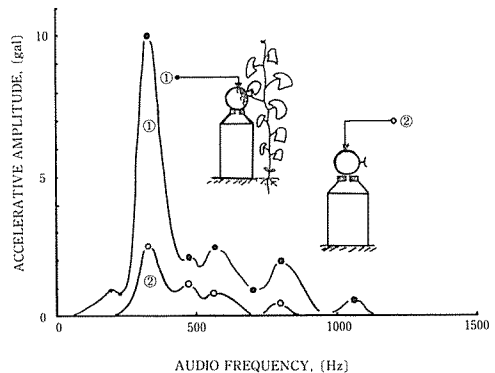


Fig. 5-9 Resonance curves for the melon fruit when it was set on the fruit-holder, ① and it was set free from the holder, ②

題ないと判断できた。すなわち、支持台上に直接果実を載せた場合と、支持台よりも数mm離して綿糸により宙吊りにして音圧を与えた場合を比較した結果は Fig. 5-9 に示すように、それらの共振周波数には互いに差異がないと判断できた。したがって、採取後の果実も生育中の場合と同様の測定法、Fig. 5-9 の①により測定した。

(1) 果実の肥大速度及び比重量

Fig. 5-10 に実測期間中のメロン果実の肥大曲線を示す。図のように果実の生育・肥大曲線は経時的に匍匐形の指数関係を示した。比重量は、この間 $0.96\text{g}/\text{cm}^3$ から $0.99\text{g}/\text{cm}^3$ まで漸次増大の傾向がみられた。しかし、収穫後においては、貯蔵期間中を通して、比重量に明確な変化はみられなかった。

(2) 生育中及び貯蔵中における果実の共振曲線

同一の果実に対して求めた共振曲線の生育中及び収穫後における測定例を Fig. 5-11 に示す。

生育中のメロンの共振点は、果実が肥大するにつれてより低い周波数域へ移行する現象がみられた。

生育中では $1,000\text{Hz}$ 以上の比較的高い周波数域で小さいながらもいくつかの共振が観察されたが、収穫時点あるいは収穫後にはこの共振点は消滅し、検出できなかった。

Fig. 5-12 は最も大きく共振した点における周波数の動きを生育中及び貯蔵中を通してプロットしたものである。共振周波数は生育中には急速に低周波数域へ移行している。しかし、収穫日前後の一時期にその移行速度が鈍っている。収穫後の貯蔵期間中には再び共振周波数の低域への移行が顕著になった。

(3) 貯蔵中における果実の目減り

メロンの貯蔵条件は温度が 15°C 及び 20°C の2通りであるが、いずれも無調湿、強制通風状態であるため、目減りは一般貯蔵法の場合より大きく目となったと思われる。

Fig. 5-13 は貯蔵中のメロンの目減り曲線である。図中の曲線(1)は貯蔵温度 15°C の場合、(2)は 20°C の場合を表わしている。すなわち、曲線(1)及び(2)の目減りは経時的にそれぞれ次のように表わせた。

$$WL_{15} = 0.429 \cdot T + 1.806,$$

..... (5-7)

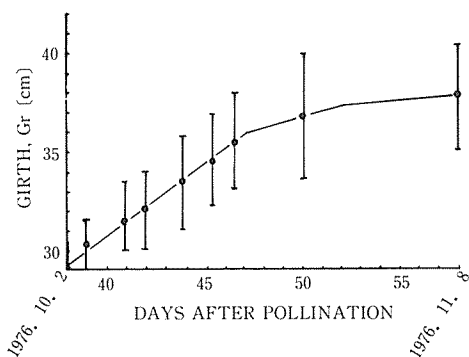


Fig. 5-10 Growth-curve of the melon fruit, cultivar Earl's Favourite, Natsukei No.7.

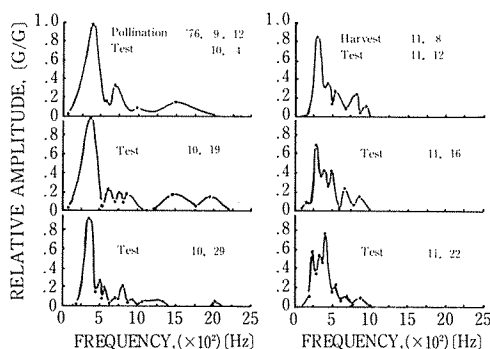


Fig. 5-11 Resonance curves during the growth and development (left), and the storage period after harvest (right).

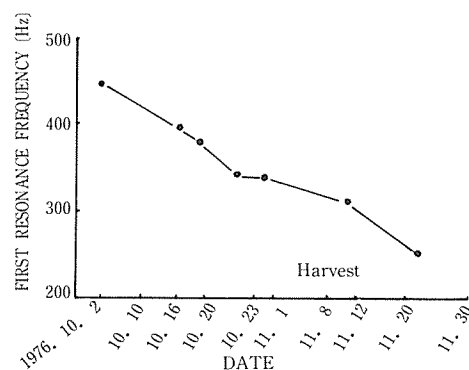


Fig. 5-12 Changes in the resonance frequency [Hz] of oS_2 mode of the melon during growth and development, and after-ripening stage.

$$r=0.699^*$$

$$WL_{20}=0.460 \cdot T + 2.168$$

..... (5-8)

$$r=0.899^{**}$$

(4) 貯蔵中における果実のヤング率

共振周波数を用いたヤング率の算出にあたっては、本実験における音波の与え方、振動の検出法を考慮して次の仮定をした。

- 1) 音波共振法によって得られたメロンの共振現象は膨張波（疎密波）による偏円体的 (spheroidal) 振動様式である。
- 2) 果実のポアソン比 μ の値は0.3~0.5の範囲とする。

膨張波による共振の spheroidal な振動様式（以下 S 振動）ではポアソン比によってその次数の発現順序が異なる。Cooke 及び Rarde は均質球体の共振様式について論じ、次のような無次元振動数 s を導入した。

$$s = \omega r \left(\frac{\rho}{E} \right)^{1/2} \quad \text{..... (5-9)}$$

ここで、 ω は角速度 (rad./sec), r は球体の半径 (cm), E はヤング率 (dyn/cm²), ρ は球体

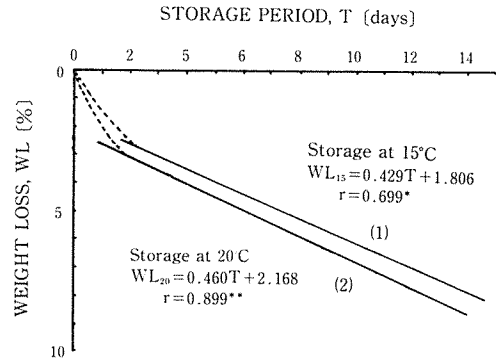


Fig. 5-13 Weight-loss of the fruit during storage.

Tab. 5-1 Spheroidal class nondimensional free vibration frequencies of a homogeneous elastic sphere, $s = \omega r (\rho/E)^{1/2}$.

i	μ	$n=0$	$n=2$	$n=3$	$n=4$
		${}_0S_0$	${}_0S_2$	${}_0S_3$	${}_0S_4$
0	0.0	2.9438	2.5921	3.7640	4.7610
0	0.1	3.3977	2.6152	3.8360	4.8747
0	0.2	4.0180	2.6327	3.8927	4.9689
0	0.3	4.9955	2.6462	3.9374	5.0460
0	0.4	7.0952	2.6569	3.9731	5.1092
0	0.5		2.6656		5.1608
		${}_1S_0$	${}_1S_2$	${}_1S_3$	${}_1S_4$
1	0.0	8.4010	4.1159	5.6443	7.2111
1	0.1	8.9700	4.4129	5.9597	7.5475
1	0.2	9.8458	4.7171	6.2920	7.8959
1	0.3	11.3971	5.0070	6.6086	8.2147
1	0.4	15.1225	5.2619	6.8811	8.4745
1	0.5		5.4730		8.6737
		${}_2S_0$	${}_2S_2$	${}_2S_3$	${}_2S_4$
2	0.0	13.0190	7.3067	8.8027	10.1642
2	0.1	13.8458	7.6340	9.1069	10.4555
2	0.2	15.1238	8.0884	9.5024	10.8375
2	0.3	17.4004	8.5272	9.8824	11.2250
2	0.4	22.9103	8.7591	10.1362	11.5163
2	0.5		8.8772		11.7185
		${}_3S_0$	${}_3S_2$	${}_3S_3$	${}_3S_4$
3	0.0	17.5425	9.0494	10.6252	12.1989
3	0.1	18.6339	9.1699	10.8406	12.4908
3	0.2	20.3230	9.4539	11.3017	13.0631
3	0.3	23.3374	10.3759	12.4277	14.1626
3	0.4	30.6503	12.0138	13.4255	14.8026
3	0.5		12.1607		14.9754

(Cooke & Rand, 1973)

Tab. 5-2 The occurrence order of the spheroidal class vibration.

μ	Order	1	2	3	4	5
0.3	Mode	${}_0S_2$	${}_0S_3$	${}_0S_0$	${}_1S_2$	${}_0S_4$
	s	2.6462	3.9374	4.9955	5.0070	5.0460
	Ratio	1.0000	1.4879	1.8878	1.8921	1.9068
0.4	Mode	${}_0S_2$	${}_0S_3$	${}_0S_4$	${}_1S_2$	${}_0S_0$
	s	2.6569	3.9731	5.1092	5.2619	7.0925
	Ratio	1.0000	1.4953	1.9229	1.9804	2.6704
0.5	Mode	${}_0S_2$	${}_0S_4$	${}_1S_2$	${}_1S_4$	${}_2S_2$
	s	2.6656	5.1608	5.4730	8.6737	8.8772
	Ratio	1.0000	1.9360	2.0531	3.2539	3.3303

の密度 (g/cm^3) である。

無次元振動数 s の値を Tab. 5-1 に示す。

これは S 振動のモード (mode) の出現順序を予測するのに利用できる。

Tab. 5-2 はポアソン比 μ が 0.3, 0.4 及び 0.5 に対する s の値を順序よく小さい順に並べ替え, s 振動様式の出現順序を表わしたものである。ポアソン比 μ が 0.3-0.5 の範囲では, 先ず最初に ${}_0S_2$ 振動現象が起こることになる。

${}_0S_2$ の共振様式の模式図を Fig. 5-14 に示す。

このあとに起こる共振振動様式は μ が 0.3 および 0.4 の場合は ${}_0S_3$, μ が 0.5 の場合は ${}_0S_4$ となる。ここでは, 最も低い振動数で起こる ${}_0S_2$ と推測される共振様式の周波数のみについて考察する。

Fig. 5-12 に示した共振周波数を式 (5-9) に代入してヤング率 E を求めるために, 式 (5-9) を次式のように変形した。

$$E = \frac{(f_n)^2 \cdot (G_r)^2 \cdot \rho}{s^2} \quad \dots\dots\dots (5-10)$$

ここで, f_n は ${}_0S_2$ 振動に相当するメロンの固有振動数 (Hz), G_r は胴回り (cm), ρ は密度 (g/cm^3) である。

式 (5-10) により求めたヤング率の貯蔵中における変化を示すと Fig. 5-15 及び 16 のようになった。

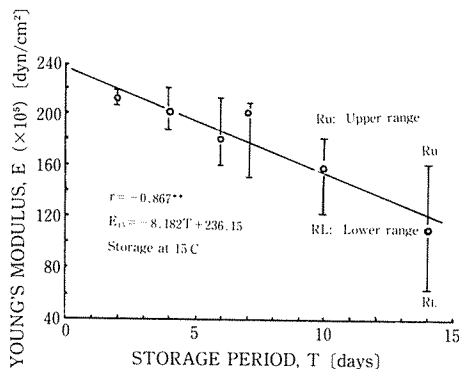


Fig. 5-15 Changes in the dynamic modulus of elasticity of the melon fruits during storage at 15°C.

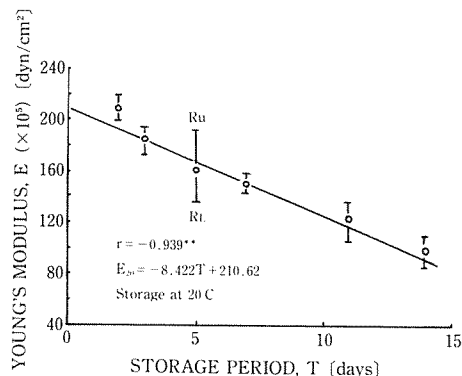


Fig. 5-16 Changes in the dynamic modulus of elasticity of the melon fruits during storage at 20°C.

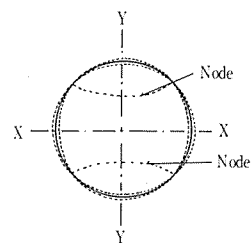


Fig. 5-14 A cross-section showing the displacement of a sphere in the ${}_0S_2$ mode.

(5) 貯蔵中における果実のヤング率と目減率との関係

メロンのヤング率の変化は先に示した貯蔵中の目減りの大きさと非常に類似の曲線を呈した。そこで、ヤング率の低下と目減りの相関及び回帰直線を求めると、15°C貯蔵区では、

$$r = -0.508^* \\ E_{15} = -6.99WL_{15} + 213.3 \quad \dots\dots\dots (5-11)$$

20°C貯蔵区では、

$$r = -0.912^{**} \\ E_{20} = -16.27WL_{20} + 241.3 \quad \dots\dots\dots (5-12)$$

であった。

(6) 食味評価

Fig. 5-17 にパネルテストの結果をまとめた。図によると、全体的にみて、貯蔵1週間目（11月15日）から10日目頃が無難な食べ頃であった。

15°C区においては、味、総合評価などからすると2週間目（11月22日）に最高値を示し、この時期が最も食味良好であった。その後、3週間目（11月29日）には外観、テタスチャ、食味などからみても商品価値が無くなったものと判断された。

20°C区のメロンは貯蔵2週間目には、色及び香りを除いて、ほとんどの評価項目で著しく配点が悪くなり、食味良好ではなかった。したがって、この場合は貯蔵後10日目後が食べ頃であると考えられた。

また、色及び香りの項目についていえば、20°C区では貯蔵中の追熟現象により評価が高くなるが、15°C区ではほとんどそれらの項目の評価値に差がみられなかった。したがって、色、香りに関する貯蔵温度条件としては20°C区がすぐれていたともいえる。

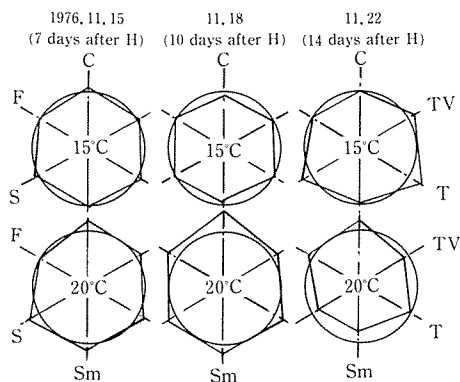


Fig. 5-17 Sensory test scores of the fruits ;
C: Colour, F: Flavor, S: Softness,
Sm: Smoothness, T: Taste, TV:
Total valuation

第6章 果実の共振様式及び共振様相

筆者は、不均質、非等方の球状果実に対し、その物性あるいは熟度を非破壊的に評価するため音波による共振法の応用を試みてきた。しかし、それら果実の共振現象が実際どのような様相で振動しているのかは未だ明らかにされていない。それらの振動様相を報告した例もない。

均質弾性球体の振動は、半径方向の放射変位分力の無い、すなわち体積的に変化のないねじれ振動（Torsional vibration, 以下 T 様式）と、偏円体振動（Spheroidal vibration, 以下 S 様式）と呼ばれ、体積的变化を伴うがねじれの分力がない縦振動とに分けられる。

従って、果実の物性、熟度の測定・評価に共振法を応用しようとする場合、その果実の支持法あるいは起振法の違いにより共振様相様式が異なることも予想される。

本章では、実際に共振実験中の果実がどのような振動様相を呈しているかを解明し、その振動様式を明確にすることを目的とする。

6.1 材料及び方法

球体振動のねじれ振動様式と偏円体振動様式をそれぞれ T_n 及び S_n と表示し、下添字の n で節数を、 i で基本振動($i=0$)か倍音振動($i=1, 2, 3, \dots$)かを示すものとするれば、振動様式は以下のように考えられている。

T 様式振動の場合、共振周波数の低い方から $T_2, {}_0T_3, {}_0T_4, {}_1T_1$ の順に出現し、また S 様式振動の場合は体積的变化を伴うためポアソン比 μ によって異なるが、 $\mu=0.3$ のとき、 ${}_0S_2, {}_0S_3, {}_0S_0, {}_1S_2, {}_0S_4, \dots$ の順に出現する。

本実験での音波共振法では綿糸により果実を宙吊りし、音波を果実の直下数mm以内の位置から鉛直の方向に与えているから、果実にねじれの分力は生じない。したがって、ここでは T 様式の振動は起らず S 様式の振動のみが生じると仮定し、振動検出も試料表皮の上下振動(果実半径方向の放射状変位)のみを検出するようにした。このためピックアップは果実表皮に対し鉛直に両面テープで接着した。

Fig. 6-1 は S 振動の振動様式を示したものである。同図に示したような振動様式に共振中の果実振動様相を同定するため、実験材料の果実には Fig. 6-2 に示すように緯線を8等分間隔に7本、経線を12等分間隔になるように12本、それぞれ線引きし、それらの交点に番号を附して測定点とした。したがって、1試料の測定箇所総数はN極(Apex)側及びS極(Stem scar)側を合せて96箇所となり、これら各点について共振中の振動強度を測定した。

実験手順を要約すると、

- 1) Fig. 6-2 のように実験材料の果実に経緯線を引き、振動強度の測定点(E, W, N, S など)を決める。
- 2) 実験材料を綿糸で吊り下げ、E点(果腹部)またはS極(果柄部)より音波を与え、W点(E点の反対側の果腹部)またはN極(果頂部)で共振点を求める。
- 3) いくつかの共振点をもつそれぞれの周波数の音波を与えながら、試料上の96箇所の測定点で振動の強さを測定する。
- 4) 次にそれぞれの測定点の振動測定値に基づき振動強度分布図を作成し、振動様相を明らかにして振動様式を決定する。

共振用実験材料には、なるべく球体に近い適当に大きい農産物が便利である。したがって、本実験では、スイカ(小玉種)、トマト、リンゴ(陸奥)及びナシ(晩三吉)を実験材料とした。

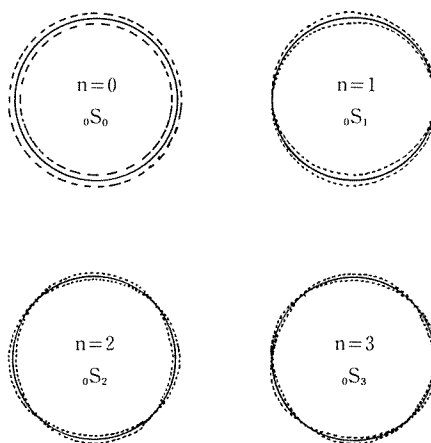


Fig. 6-1 Spheroidal vibration modes for the first four resonant frequencies.

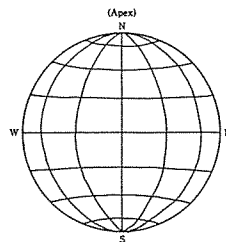


Fig. 6-2 Measurement points are the intersections of two lines and poles, N and S.

振動測定には振動計 (VM-02, リオン) 及び圧電型ピックアップ (PV-11A, 3.3mV/G, 重さ 1g, リオン K.K.) を用いた。

6.2 結果及び考察

6.2.1 最も低い周波数で最初に現われる共振現象

1) スイカ (小玉種) の場合, スイカは他の果実に比較すると, かなり弱い音波の刺激に対しても強い応答を示した。

Fig. 6-3 はスイカ (小玉種) の共振曲線である。スイカは最初の共振点で最も強く振動し

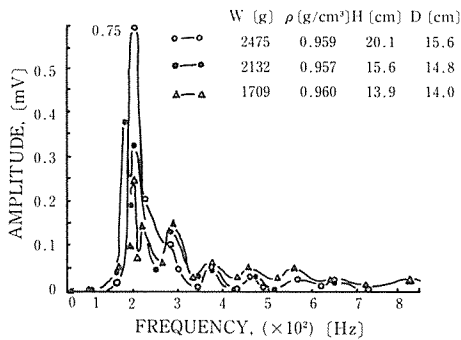


Fig. 6-3 Resonance curves of water melons.

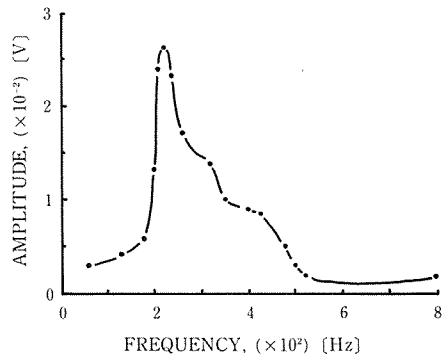


Fig. 6-5 Resonance curve of an intact tomato fruit, partially colored.

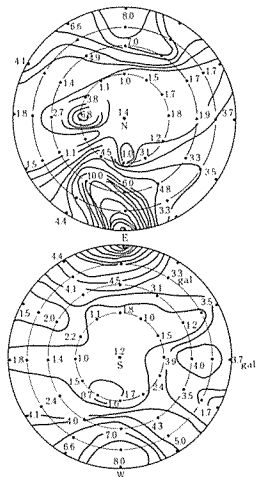


Fig. 6-4 Resonance vibration distribution on the fruit surface at the first resonant point.
Sample: watermelon, weight: 1700g, height: 15.9 cm, dia: 14.0 cm, figures' unit: gal.

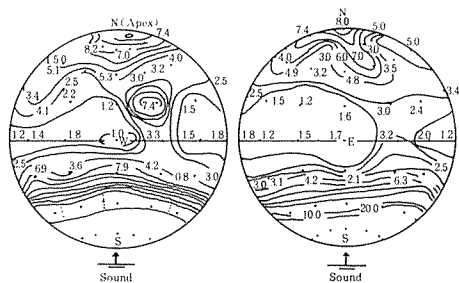


Fig. 6-6 Resonance distribution of an intact tomato fruit, at 220 Hz sonic sound, S→N.

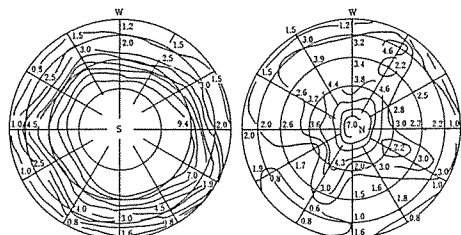


Fig. 6-7 Resonance distribution of an intact tomato fruit, at 220 Hz sonic sound S→N, view from S and N side respectively.

た。この共振点における共振様相は Fig. 6-4 のようであった。

2) トマトの場合, トマトの一部着色果に対する共振曲線を Fig. 6-5 に示す。最初の共振点における振動強度分布を測定したところ, E 及び W 側からの振動様相は Fig. 6-6 のようであった。

これは励起音波を果実の果底部から与えた場合の振動様相である。音源部位が強く振動し, 赤道緯近辺が弱く, N 極 (果頂部, すなわち音源と正反対側) が再び強く振動した。

Fig. 6-7 は, 同じ試料を用いて, 同り条件下で, 再現実験をした結果を N 極及び S 極側から振動強度の等高線で描いたものである。おおよそ Fig. 6-6 に示した側面からの共振様相と類似の結果となっている。

6.2.2 リンゴの共振様相と様式

1) 623Hz の共振様相

Fig. 6-8 はリンゴ (陸奥) の共振曲線である。623Hz における最初の共振様相を図示すると Fig. 6-9 のようであった。果軸 (N-S) 方向の振動強度と果腹部の赤道緯半径の放射状方向の振動強度には, その強度においてかなりの差異がみられるが, これを果実の構造上および起振方向に原因があると考えれば, 全体的にみて概ね典型的な ${}_0S_2$ の共振様式であると判断できる。

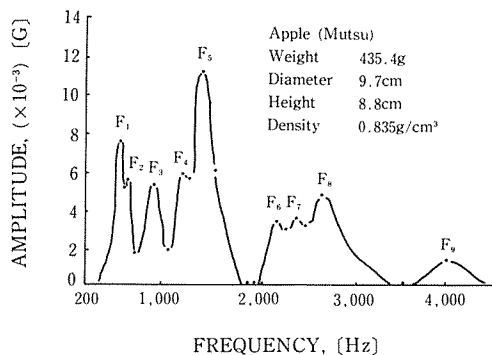


Fig. 6-8 Resonance curves of an intact apple fruit, cultivar Rutsu.

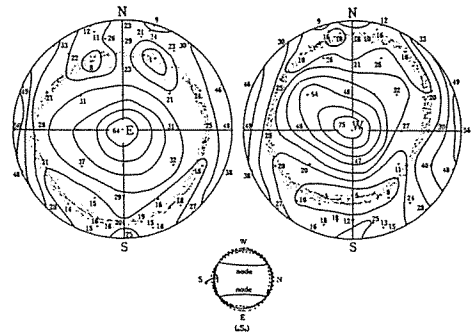


Fig. 6-9 Resonance distribution at the first resonant point, F1 (623 Hz) E→W, apple fruit (Mutsu).

2) 665Hz (F_2) の共振様相と様式

共振様相としては, 623Hz の場合と同様に ${}_0S_2$ と考えられるが, Fig. 6-10 に示すように, この共振点では節線 (node) が 90° 回転した状態の共振様相であった。 ${}_0S_2$ の振動様式は音圧刺激点 E あるいはその反対点 W を囲んで赤道に対して垂直な環状節線が強く表われるが, この場合の振動様相では N 極および S 極を囲む節線がより強く出現しているのが特異的である。すなわち, N 極および S 極が極端に強く共振し, かつ赤道面は一様に大きい振動をしている。この現象の振動様式をここで ${}_0S_2$ と仮称する。

リンゴは N-S 極を軸に果軸, 種子胎座部そしてこれを取り囲む繊維組織を主とする果芯部

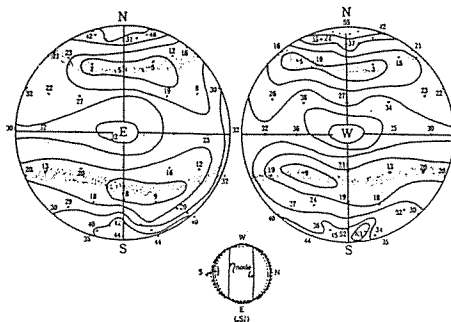


Fig. 6-10 Resonance distribution at the second resonant point, F2 (665 Hz), E→W, apple fruit.

を有する。この構造がN-S方向の振動変位に大きく影響するものと考えられる。

E-W方向に音波を与えた場合、まずFig. 6-9の下部に略図で示すような ${}_0S_2$ の共振が起る。さらに高い周波数の音波を与えていくと ${}_0S_2$ の振動様式は弱まり、Fig. 6-10に示すような ${}_0S_2'$ (仮称)の共振様式が出現する場合があった。このような現象は果芯部と果肉部の固有振動数の微妙な差異により生ずるものと考えられる。果芯部の変位運動に対して特に大きい抗力を有する未熟果の場合にはこの現象は出現せず、比較的良好に熟した状態でこの共振現象は現われた。

したがって、新鮮で熟度が余り進んでいないリンゴには ${}_0S_2'$ は出現しにくく、熟度が進み果芯部と果肉部との間の堅さがゆるみ、それらの部位における固有振動数が微妙な差異の範囲に入ってくると、この ${}_0S_2'$ の共振が出現するものと考えられる。スイカ、メロン、トマトなど果肉部を果芯が貫いていないような果実には ${}_0S_2'$ の現象はみられなかった。

3) 952Hz (F_3) の共振様相と様式

大体において、Fig. 6-11に示す952Hzの振動様相には節線が3本観察できる。したがって、この振動様式を ${}_0S_3$ と推定できる。

4) 1,244Hz (F_4) の共振様相と様式

NおよびS極が極端に小さく振動していることを除けば、全体的に一樣な共振強度の分布を示している。したがって、 ${}_0S_0$ の共振様式であると推定できる (Fig. 6-12)。

5) 1,466Hz (F_5) の共振様相

音圧刺激点Eの正反対側のW点における振動が非常に強く検出された (Fig. 6-13)。

6) 2,212Hz (F_6) の共振様相

共振の強い部分と弱い部分が互いに交錯し合って複雑な振動様相を呈した (Fig. 6-14)。

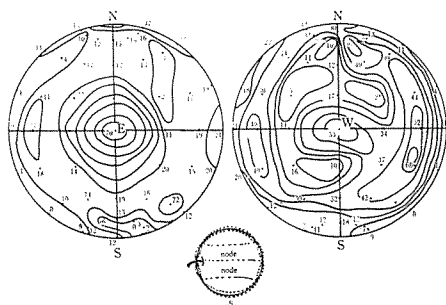


Fig. 6-11 Resonance distribution at the third resonant point (952 Hz, E→W), unit in acceleration ($10^{-4}G$), apple.

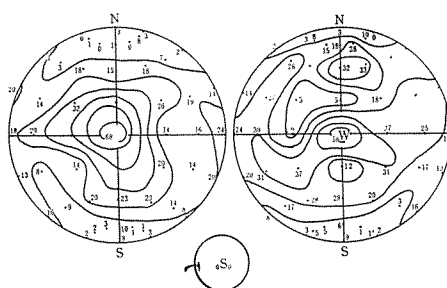


Fig. 6-12 Resonance distribution at the 4th resonant point (1244 Hz, E→W), apple.

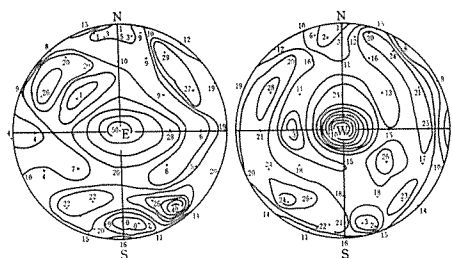


Fig. 6-13 Resonance distribution at the 5th resonant point (1466 Hz, E→W), apple.

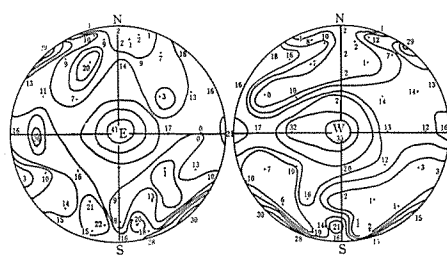


Fig. 6-14 Resonance distribution at the 6th resonant point (2212 Hz, E→W), apple.

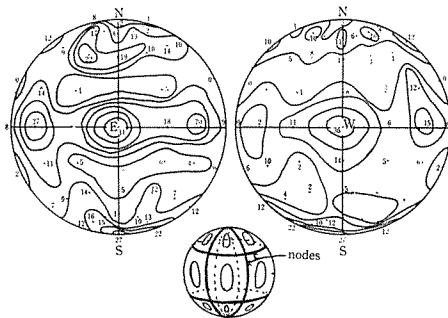


Fig. 6-15 Resonance distribution at the 7th resonant point (2399 Hz, E-W), apple.

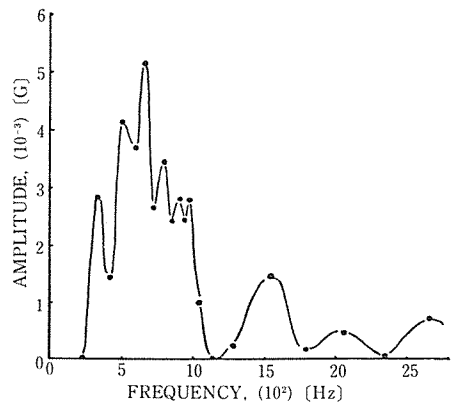


Fig. 6-16 Resonance curve of a Japanese pear fruit (cultivar, Okusankichi) —on marketing stage, measured at 10°C—

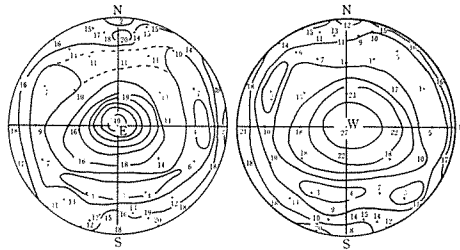


Fig. 6-17 Resonance distribution on the fruits surface (J. pear, Okusankichi) at the first resonant point, 361 Hz, E-W: unit; (10^{-4}) [G].

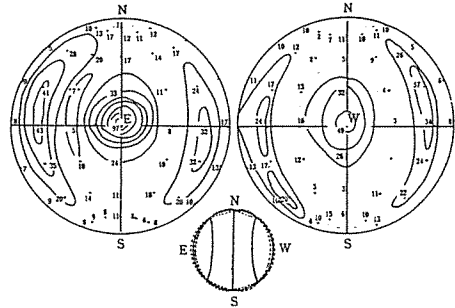


Fig. 6-18 Resonance distribution on the fruit's surface (J. pear, Okusankichi) at the second resonant point, 537 Hz, E-W.

7) 2,399Hz (F_7) の共振様相

赤道面上のE点, W点及びそれらの間に等間隔に2個の強い振動部分がみられる。これらは60°間隔に位置している。しかし, Fig. 6-15の右図においてはW側左60°の点に強い振動がみられず, 逆に弱い振動部分が観察された。この点を除けば, E-W間に60°間隔で6個の強い振動域があると考えられ, E-W間に3本のN-S方向の節線(計6本)とN-S間に2本の節線(計4本)が存在すると推定できた (Fig. 6-15, 下略図参照)。

6.2.3 ナシの共振様相と様式

Fig. 6-16はナシの共振曲線である。この曲線には361Hz, 537Hz, 666Hz, 791Hz, そして1,513Hzに特に明確な共振点がみられた。したがって, 以上の5つの共振点における振動の強度分布を求め, 振動様相をみた。

1) 361Hzの共振様相と様式

Fig. 6-17は361Hzの共振点における振動様相である。この振動様相には比較的明確な2本の節線がみられ, 典型的な s_2 の振動様式であると判断される。図では節に相当する部位もかなり振動しているが, これは試料の非均質, 非等方球体, および不完全弾性(粘弾性)体という複

雑な物性がその原因の一つであると考えられる。

2) 537Hzの共振様相と様式

理論的には ${}_0S_2$ の振動様式の次に ${}_0S_3$ の振動様式が現われるが、Fig. 6-18 はまさに ${}_0S_3$ の振動様相であると判断できる。すなわち、音源側Eとその正反対Wとの間に3本の節線が存在し、それらの中間（腹）が激しく振動している様子がみられる。

3) 666Hzの共振様相と様式

この共振点がナシの共振曲線上の最大の共振強度に位置している。振動強度分布を音源(E)側半球とその反対(W)側半球について図示するとFig. 6-19 のようであった。N極およびS極

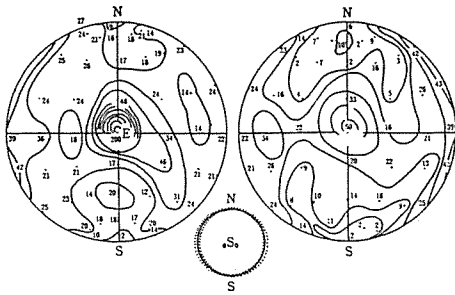


Fig. 6-19 Resonance distribution at 666 Hz (the third resonant point) — J. pear, Okusankichi: unit; ($\times 10^{-4}$) [G]

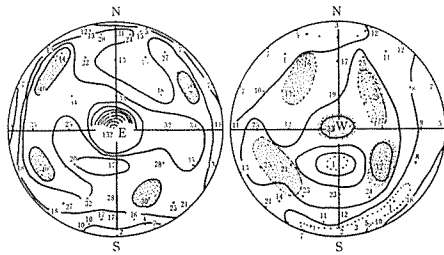


Fig. 6-20 Resonance distribution at 791 Hz (the fourth resonant point) — J. pear, Okusankichi —.

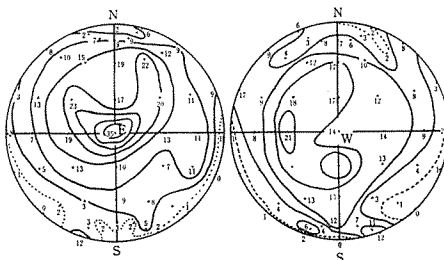


Fig. 6-21 Resonance distribution at 1513 Hz (the fifth resonant point) — J. pear, Okusankichi —.

を除き、全体的に比較的均一な強い振動分布を示し、 ${}_0S_0$ の振動様相であると考えられる。

4) 791Hzの共振様相

Fig. 6-20 に示すように、音源部Eが最も強く振動し、そこから離れるに従い振動が弱まるが、図中にマスクして示したように、部分的に強い振動がほぼ等間隔にみられた。

W側半球では、W点に近づくに従い振動が強くなるが、その中でも極端に弱い振動部分がみられたり、N極およびS極附近の振動が非常に小さいなど不安定である。マスクした部位が部分的に強振動であれば、W側半球とE側半球とは相似の振動様相であると判断でき、かなり規則的な節腹の存在が推定できる。

5) 1513Hzの共振様相

Fig. 6-21 に示すように、音源部Eとその正反対のW近辺で、少し強い振動がみられる。外観上、791Hzの場合より単調な様相となっている。

6.3 総合考察

S様式の振動はその物体のポアソン比に影響されるが、農産物のポアソン比を正確に求めた報告はみない。リンゴおよびナシのポアソン比についての報告が数例みられるが、そのポアソン比も1個の果実全体そのまま求めたものではない。

リンゴについては、果肉から円柱型試料をくり抜き、これについて準静的測定法によってそのポアソン比を求めたものがある。それによると、0.21から0.34の範囲で平均0.26である。これらの報告側を考慮し、リンゴ、ナシのポアソン比を以下0.3と仮定する。

同一試料に対しては、半径を r 、密度を ρ 、

ヤング率を E とすれば, $r \cdot \sqrt{\rho/E}$ が一定であるから, その S 様式の無次元振動数 S ,すなわち

$$\begin{aligned} s({}_0S_2) &= \omega({}_0S_2) \cdot r \cdot (\rho/E)^{1/2} \\ s({}_0S_3) &= \omega({}_0S_3) \cdot r \cdot (\rho/E)^{1/2} \\ &\vdots \\ s({}_iS_n) &= \omega({}_iS_n) \cdot r \cdot (\rho/E)^{1/2} \end{aligned}$$

を, 最初の共振周波数 $s({}_0S_2)$ に対する比で表わすと,

$$\begin{aligned} \frac{s({}_0S_3)}{s({}_0S_2)} &= \frac{\omega({}_0S_3)}{\omega({}_0S_2)} = \frac{f({}_0S_3)}{f({}_0S_2)} \\ \frac{s({}_0S_4)}{s({}_0S_2)} &= \dots\dots\dots = \frac{f({}_0S_4)}{f({}_0S_2)} \\ &\vdots \qquad \qquad \qquad \vdots \qquad \qquad \qquad \vdots \\ \frac{s({}_iS_n)}{s({}_0S_2)} &= \dots\dots\dots = \frac{f({}_iS_n)}{f({}_0S_2)} \end{aligned}$$

となる.

Tab. 6-1 は均質球体の理論的無次元振動数 S , 共振様式および, Rome Beauty (リンゴ) に対する三媒質モデルによる計算値, それに晩三吉 (ナシ) と陸奥 (リンゴ) に対する実験値をまとめたものである.

Tab. 6-1 によると, 低周波数域における共振様式 ${}_0S_2$, ${}_0S_3$, ${}_0S_0$ はほぼ同じ振動数比で出現し, 理論値とほぼ合致していることを示した. したがって, 実験から求めた共振時の振動様式の低周波数域における同定はほぼ正確なものと考えられる. しかし, 4次あるいは5次以上の倍音共振になると Cooke らの三媒質モデルの計算値と合致せず, 共振様相もはっきりした節腹を示

Tab. 6-1 Summary of the theoretical and measured values of nondimensional resonance frequency, S , for a homogeneous elastic sphere, apples and pears

Theory, when $\mu=0.3^{*1}$				Calculated* ² (Rome Beauty (Red))			Measured					
							Pear (Okusankichi)			Apple (Mutsu)		
Order	Mode	S	Ratio	Mode	F _r (H _z)	Ratio	Mode	F _r (H _z)	Ratio	Mode	F _r (H _z)	Ratio
1	${}_0S_2$	2.6462	1.0000	${}_0S_2$	680	1.0000	${}_0S_2$	361	1.0000	${}_0S_2$	623	1.0000
2	${}_0S_3$	3.9374	1.4879	${}_0S_3$	1016	1.4941	${}_0S_3$	537	1.4875	${}_0S_2'$	665	1.0674
3	${}_0S_0$	4.9955	1.8878	${}_0S_4$	1318	1.9382	${}_0S_0$	666	1.8448	${}_0S_3$	952	1.5280
4	${}_1S_2$	5.0070	1.8921	${}_0S_0$	1352	1.9882	$({}_0S_4)$	791	2.1911	$({}_0S_0)^1$	244	1.9967
5	${}_0S_4$	5.0460	1.9068	${}_1S_2$	1485	2.1838		918	2.5429		1466	2.3531
6	${}_1S_3$	6.6086	2.4973	${}_0S_5$	1605	2.3602		961	2.6620		2212	3.5505
7	${}_1S_4$	8.2147	3.1043	${}_0S_6$	1880	2.7647		1513	4.1911		2399	3.8507
8	${}_2S_2$	8.5272	3.2224	${}_1S_3$	1918	2.8205		2030	5.6232		2640	4.2375
9	${}_2S_3$	9.8824	3.7345					2699	7.4764		3903	6.2648
10	${}_3S_2$	10.3759										
11	${}_2S_4$	11.2250										
12	${}_1S_0$	11.3971										

*1 From J. R. Cooke and R. H. Rande, A Mathematical study of resonance in intact fruits and vegetables using a 3 media elastic sphere model (1973, TAB. 2).

*2 From —, (— Tab. 4).

さなくなるため、振動様式の同定が不可能であった。

以上の結果から、共振現象の最適測定部位は、リングの場合にしばしば観察された ${}_0S_2'$ の振動様式を除けば、起振源Eと正反対に位置するWであるといえる。この位置は、本実験で同定されたどの共振様相においても最も良い応答を示した。N-S方向の起振の場合は、したがってSまたはNが最もよく応答し、共振検出の最適点であることが明らかであった。

起振源と正反対の1点以外の点で振動を検出する場合は、ある共振点では腹に、ある共振点では節に検出点が位置することもあるため、当然その検出点で求める共振曲線は果実全体の共振強度と異なる場合も生じる。

最近、Yong, Y. C. と Bilanski, W. K. (1979) が行った実験の中で、リングの第1, 第2共振点における振動様式の決定において、第1次共振が100~150Hz, 第2次共振が900Hz前後にあると報告している。これは本報の結果と一致しないが、これはリングの品種が異なること、熟度、大きさなどが必ずしも同一条件ではないことなどにより当然考えられる。また、本論文の目的が振動様式の決定にあるので、この点については問題ではない。しかし、Yongらが100~150Hzの第1次共振点の振動様相は1自由度系の古典的なケルビンモデルで表わせるとし、さらに第2次共振点の900Hz前後の振動がSpheroidalな ${}_0S_2$ の様式であると結論づけていることについては本論と関連するところである。このことについても本論と一致しない。しかし、本実験でYongらの言う1自由度系ケルビンモデルで表わせる100~150Hzの共振が観察されなかったのは、実験法の違いによるところが大きい。Yongらは振動台の上に直接、試料を載せているだけであるが、これに対し本論文の実験法では綿糸で試料を宙吊りにして音波でその試料の自由振動を励起する方法を採用している。したがって、起振力の小さい音波では、Yongらの言う第1次共振が現われないことが充分予測され、矛盾するところではないと考える。

第7章 音波共振用果実支持台の検討

音波共振法による果実の物性・熟度等の評価法においては、再現性を充分満足するような測定法を確立することが重要である。

Finneyら(1968, 1970)は、起振法に電磁振動板を用い、その板上に試料を載せ、ゴムバンドで固定し、その共振曲線を得たり、スピーカによる音圧方式を用いて共振曲線を求めたりしているが、筆者の経験からはいずれも再現性などに若干の難点がみうけられた。すなわち、振動板上に固定して測定した場合は検出される振動が振動板の振動に試料の共振が重なり合った形で現われるし、スピーカ方式のものもスピーカを内蔵する試料支持台自体の共振が、検出したい試料の共振曲線に入ってくる場合がある。したがって、後者の場合はスピーカボックス(支持台)の振動を無くすることが重要になってくる。

本章では、スピーカ方式による音波共振法を用いる場合の果実の支持台、支持方式、音波刺激面積としての音圧口径などの検討を行い、再現性の高い共振測定用の支持台を開発しようと試みた。

7.1 材料及び方法

本実験に供試するために試作したスピーカ音圧式果実共振用支持台の概略図をFig. 7-1, 2に示す。

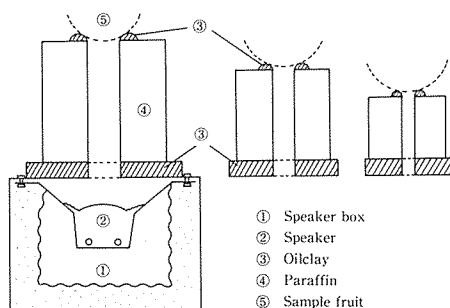


Fig. 7-1 Fruit-holder; Type I.

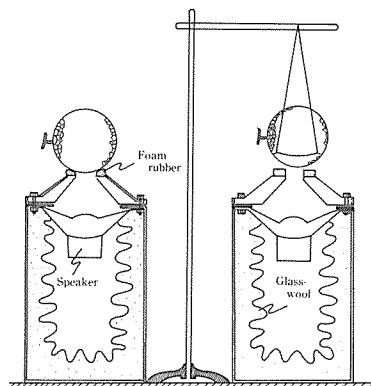


Fig. 7-2 Fruit-holder Type II left: holding, right: pending.

Fig. 7-1 はスピーカを内蔵したボックスの音圧出口に油粘度およびパラフィン (C_nH_{2n+2} , melting point $60\sim 62^\circ C$) で作成した円筒型果実支持台を装着して構成しているもので、これを果実支持台 I 型と仮称する。

Fig. 7-2 は、スピーカボックス音圧出口にはクッション材(フォームラバーなど)をはさんで内側が円錐型ダクトの果実支持台を装着し、さらに果実との接触面にはフォームラバーあるいはグラスウールなどを敷いているもので、これを果実支持台 II 型と仮称する。

共振用果実支持台を検討するための果実の共振測定実験は、次の場合について行った。

- 1) 果実支持台 I 型を用い、その音圧口径を変えた場合
- 2) 果実支持台 I 型とボックスの間にクッション材をはさんだ場合 (改良 I 型)
- 3) 果実支持台 II 型を用いた場合
- 4) 果実支持台 I 型, II 型の対照として、果実を綿糸で吊り下げ、空中で共振させた場合

7.2 結果及び考察

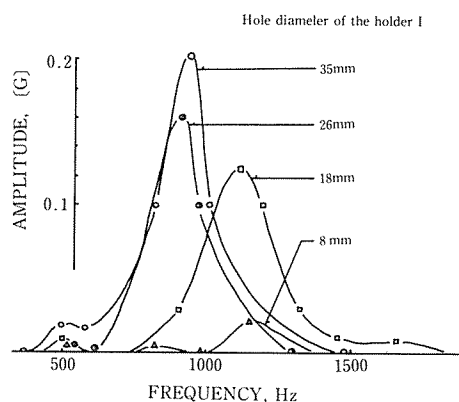


Fig. 7-3 Effect of fruit-holder's diameter on the resonant curves of the same sample, apple, Mutsu.

Fig. 7-3 は、果実支持台 I 型を用いてリングの共振実験を行った場合に得た共振曲線である。音圧はリングの果軸に対し鉛直方向に果腹部最大直径部位から与えた。リングに与える音源面積は、8 mm, 18mm, 26mm, および35mmの口径をもつ支持台を用いて変化させた。これらの結果によると図に示したように果実に与える音源面積の大きさにより、かなりの共振点のずれと振動の強さにおける差異があった。共振点のずれは、果実支持台を含む共振装置全体の不備により、スピーカボックス及び果実支持台自体の振動がかなり影響していることも考えられた。振動の大きさの差異は、音源面積(果実支持台の口径)に比例する音圧刺激の強さがそのまま振動応答の強弱となって現われたものと考えられ

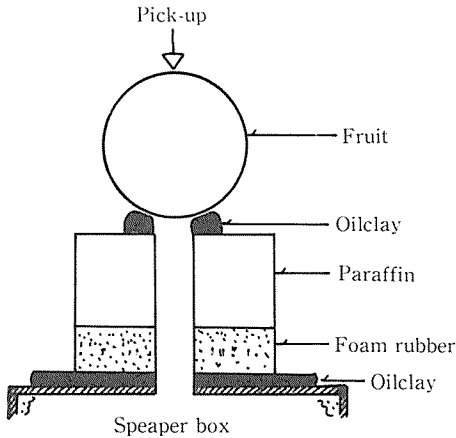


Fig. 7-4 Reformed fruit-holder; Reformed I type.

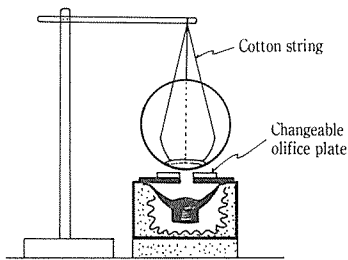


Fig. 7-6 Suspending method.

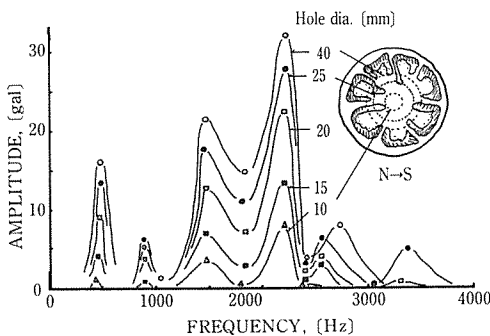


Fig. 7-7 Resonant curves obtained by suspending method on a tomato fruit.

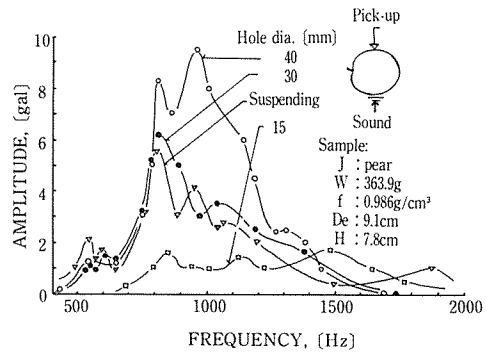


Fig. 7-5 Resonant curves obtained by the reformed fruit-holder, Reformed I.

る。

したがって、次にスピーカーボックスと支持台 I 型との間にフォームラバをはさみ、ボックスの微振動が支持台に伝達されないように改良を加えた、その改良 I 型の概略図を Fig. 7-4 に示した。

改良 I 型果実支持台による共振実験を前例と同様に行ったところ、Fig. 7-5 のような結果を得た。すなわち、共振点においては支持台穴径の違いによってまだ若干の差異がみられるが、Fig. 7-3 と比較してみれば、かなり共振点が収束したとみることができる。

また、Fig. 7-5 の果実の振動振幅の大きさにおいても Fig. 7-3 の場合と同様に支持台音源口径の大きさ、すなわち音圧刺激面積の大きさに比例していることが判明した。

以上の結果から、音源面積と共振点のずれは無関係であることが推測された。そこで、このことを確認するため綿糸による果実の空中支持法によって共振実験を行った。まず果実支持台自体の振動が果実に伝達されないように、綿糸により果実を支持台から吊り上げた。支持台と果実下側表面との距離は 1～2 mm 程度である。果実支持台の構造はこの場合には関係がないと考えて、簡単にとり換えができるパラフィン製のオリフィス板とした。果実支持法およびオリフィス板の概略図を Fig. 7-6 に示す。

Fig. 7-6 のオリフィス板を大径の穴をもつも

のから小径のものへ、あるいは逆に小径から大径へ取り変えて音源面積を変化させながら共振曲線を測定した。その結果、推測した通りの共通点の一致をみることができた。この結果を Fig. 7-7 に示す。

すなわち、音源面積（音圧吐出口径）の大きさが、共振ピークの高低つまり共振振動の強さには影響するが、共振ピークのずれ（共振周波数の差異）には無関係であることを示した。

したがって、実際には果実支持台を改良して、支持台自身の振動とかエアカップリングを無くし、綿糸による宙吊り測定法と同様の再現性の高い測定値が得られるような構造にすることが重要になってくる。

音源口径の妥当な大きさを強いて上げれば Fig. 7-5 に示しているように、空中支持方式の共振点とほぼ一致する共振点をもつ30mmおよび40mmの音源口径が良いと考えられる。

そこで、口径30mmの円錐型ダクトをもつ果実支持台II型を作成し、これを用いて果実の共振実験を行った。その結果は先に第5章の Fig. 5-9 に示したように、空中支持法で得た共振周波数において一致していることを実証した。

以上のような実験結果を総合すると次のようにまとめることができる。

果実支持台I型により得た共振曲線の共振周波数のずれは、音源面積（口径）の違いによるものではなく、果実の支持法あるいは果実支持台の不備によるものであった。

音源面積の大小は果実の共振周波数には無関係である。

果実へ与える音源口径は、果実の直径より適度に小さければよいが、30mmから40mmが適切である。

果実支持台そのものの構造をより完璧にして支持台の共振あるいは振動が果実に伝達されないようにしなければならない。

果実支持台の音波を伝播する気柱は気密であるより、適度な吸音効果をもたせてエアカップリングを防いだ方がよい。

改良を加えた果実支持台II型による共振曲線の測定結果はほぼ満足できるものであった。

したがって、より実践的な支持台を開発できる可能性が十二分にあることがわかり、今後の実用化研究に期待できる。

第8章 果実の共振曲線に及ぼす品温の影響

生鮮果菜類の共振曲線を測定し、それらの固有振動数と物性・熟度等との関係を調査して、いくつかの知見を報告してきたが、その間、同一品種、同程度の熟度と推定される産物の共振曲線において、時期的に若干の差異があるような現象がみられた。もし、差異があるとすれば、その原因として、

- (1) 同一品種の果菜類においても、季節によりその果肉物性に若干の変動がある。
- (2) 測定する果菜類の品温すなわち環境温度により共振曲線が影響される。

以上の二点が考えられる。

もし、上記(2)の原因により、共振曲線が影響されているとすれば、共振曲線を利用する物性判断には大きな誤差を伴うことになる。

本章では、この点について若干の実験的調査を行った。

8.1 材料及び方法

供試材料は市販のリンゴ（品種は富士、陸奥）、ナシ（晩三吉）およびトマト（東光）であ

る。実験装置の概略図を Fig. 8-1 に示す。すなわち、温度が任意に設定できる恒温槽とその中に入れた起振源のスピーカボックス、ピックアップ（リオン製、PV-11A、加速度型）、そして振動を与えるオシレータ、アンプ、試料の振動を検出、指示する加速度計、オシロスコープ及び周波数カウンタなどから構成されている。

恒温槽内には吸音材としてフォームラバーを厚く張りつけた。恒温槽は強制通風式で、槽内温度は 0°C 、 10°C 、 20°C 、 30°C 、および 40°C の 5 段階に設定した。測定する試料は恒温槽内に入れ、試料温度がほぼ設定温度に達したのち共振実験を開始した。

実験値に正確さ及び再現性を期すために温度は 0°C から順次 10°C 、 20°C 、 30°C 、 40°C へと変化させ測定したのち、さらに 40°C から逆に、 30°C 、 20°C 、 10°C 、 0°C へと温度を下げながら同様の測定を行った。

試料の冷却あるいは加温時間は、槽内温度が一定してから 80 分以上とした。

さらに加えて、本章では -20°C に凍結したリンゴについてもその共振曲線を求めてみた。

8.2 実験結果

市販のリンゴ（富士）、4 個についてその品温を変化させ、品温毎における共振曲線を測定した結果を Fig. 8-2 に示す。これらの結果から明らかなように、共振曲線はその試料の品温にかなり影響を受けている。

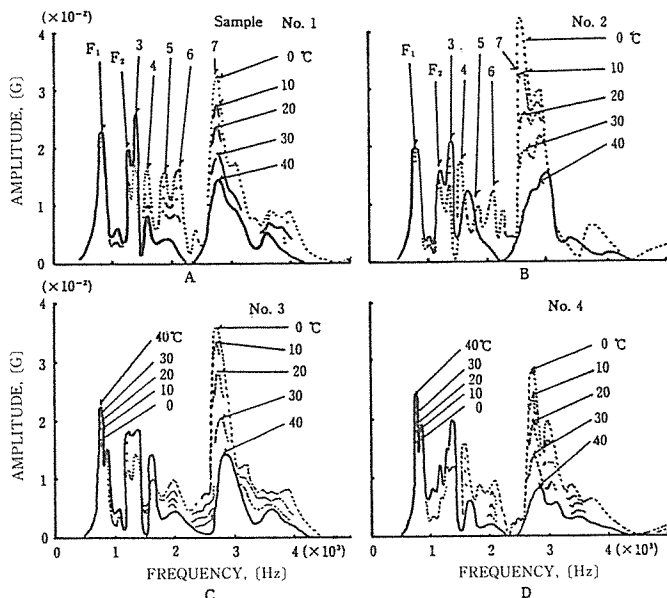


Fig. 8-2 Effect of temperature on resonance curves of the apple (cultivar Fuji).

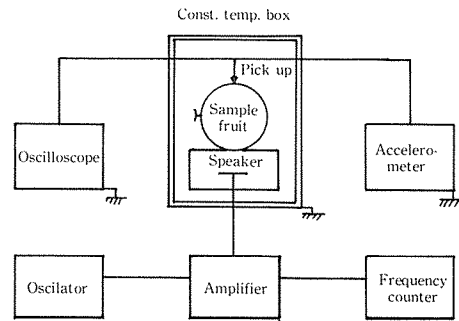


Fig. 8-1 Schematic diagram of measurement instrument.

まず共振強度についてみれば、 1500Hz から 1600Hz 附近を境にして、これより低周波数域側においては品温が高くなるほど振動応答が大きくなった。 1600Hz 以上の高い周波数域では逆に品温が低くなるほど応答が大きくなった。

共振周波数についてみれば、共振強度の場合と同様に品温により若干の変動がみられるが、共振強度の場合ほど明確ではない。

主な共振点における周波数のずれに対する品温の影響をまとめると Tab. 8-1 から 4 のようであった。例えば、Tab. 8-1 における第

Tab. 8-1 Effect of fruit temperature on the resonance frequency, F_1 Hz

Temperature T.	Sample No.				Mean
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	
0°C	816	809	774	761	790
10	812	802	770	755	785
20	811	795	770	757	783
30	809	792	767	757	781
40	806	798	766	762	783

$$r = -0.829, B = -0.18, A = 798, (F = BT + A)$$

Tab. 8-2 Effect of fruit temperature on the second resonant frequency, F_2 Hz

Temperature T.	Sample No.				Mean
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	
0°C	1258	1239	1239	1244	1245
10	1243	1229	1235	1235	1237
20	1242	1234	1234	1235	1236
30	1248	1249	1239	1236	1243
40	1230	1255	1221		1235

$$r = -0.493, B = -0.14, A = 1242, (F = BT + A)$$

Tab. 8-3 Effect of fruit temperature on the third resonant frequency, F_3 Hz

Temperature T.	Sample No.				Mean
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	
0°C	1445	1408	1413	1360	1407
10	1436	1412	1403	1365	1404
20	1422	1418	1397	1356	1398
30	1416	1431	1392	1367	1402
40	1379	1451	1367		1399

$$r = -0.775, B = -0.18, A = 1405.6, (F = BT + A)$$

Tab. 8-4 Effect of fruit temperature on the seventh resonant frequency, F_7 Hz

Temperature T.	Sample No.				Mean
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	
0°C	2745	2680	2742	2708	2719
10	2749	2675	2731	2719	2719
20	2767	2688	2731	2735	2730
30	2783	2773	2793	2766	2779
40	2771	2745	2832	2811	2970

$$r = 0.929, B = 2.02, A = 2707, (F = BT + A)$$

Tab. 8-5 Effect of fruit temperature on the resonant amplitude of F_1 ($10^{-4}G$)

Sample No.	1	2	3	4	Mean
Temperature T.					
0°C	206	188	174	188	189
10	209	198	191	195	198
20	211	198	204	202	204
30	218	192	223	223	218
40	231	200	217	242	223

$$r = 0.991, B = 0.88, A = 188.8, (Y = BT + A)$$

Tab. 8-6 Effect of fruit temperature on the second resonant amplitude, F_2 ($10^{-4}G$)

Sample No.	1	2	3	4	Mean
Temperature T.					
0°C	141	132	120	128	130
10	151	138	131	138	140
20	162	145	189	150	162
30	186	157	150	165	165
40	199	157	160		172

$$r = 0.963, B = 1.09, A = 132, (Y = BT + A)$$

Tab. 8-7 Effect of fruit temperature on the third resonant amplitude, F_3 ($10^{-4}G$)

Sample No.	1	2	3	4	Mean
Temperature T.					
0°C	192	136	177	115	155
10	182	144	188	125	160
20	181	160	192	151	171
30	219	189	228	202	210
40	261	210	251		241

$$r = 0.951, B = 2.22, A = 143, (Y = BT + A)$$

Tab. 8-8 Effect of fruit temperature on the 7th resonant amplitude, F_7 ($10^{-4}G$)

Sample No.	1	2	3	4	Mean
Temperature T.					
0°C	306	420	360	278	341
10	280	340	350	236	302
20	251	260	292	173	234
30	207	186	206	129	182
40	154	132	150	80	129

$$r = -0.998, B = -5.44, A = 346.4, (Y = BT + A)$$

1次共振周波数のずれをみると、それぞれの試料で7から11Hzの大きさであった。そのずれは、第2次、第3次…の共振点ではさらに大きくなる傾向があった。同様に品種と共振強度の関係を Tab. 8-5 から 8-8 に示した。

Fig. 8-3 は同じくリング、品種は陸奥に対する共振曲線である。富士の場合と同じ傾向であるが、ある周波数を境にしてこれより高域側の周波数では品温が低いほど振動応答が大きくなり、これより低域側の周波数では逆の現象が起こるその変異点の周波数は1300Hz から1500Hz の帯域にあった。

すなわち、この1300から1500Hz の変異点周波数域より低域の周波数では品温が高くなるほど振動応答が大きくなり、逆にそれより高域の周波数では品温が低いほど振動応答が大きくなった。

Fig. 8-4 はナシ(晩三吉)の可食段階における共振曲線である。

ナシの場合は、リングの場合と異なり、いくつかのピーク(共振点)が重なり合った形が多くなり、第1共振点(F_1)と第2共振点(F_2)の谷間、及び1200Hz 附近の谷間を除けば明確な谷間とはならなかった。ナシの共振曲線は全体的にみると、品温が高くなるほど振動応答が大となったが、やはりリングの場合にみられたように高域側周波数では品温が高くなるほど振動応答は小さくなった。その変異点は1200Hz 前後の周波数域であった。

Fig. 8-5 はトマト(品種は東光)の果頂部が彩色した適熟果についての同様の測定例である。音波の果実

に対する駆動方向はS-N(果頂)、すなわち果軸方向である。この場合は1100Hz前後のところで逆転し、これより低い周波数域では品温が高いほど応答が大きくなり、これより高い周波数域では逆に品温が低いほど応答が大きくなった。

トマトの場合は、全体的に品温による共振周波数のずれは小さかった。なかでもトマトの共

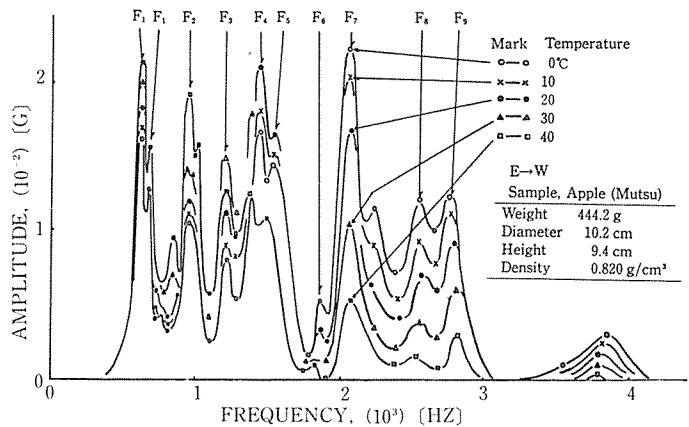


Fig. 8-3 Effect of temperature on the resonance curves of the apple (cultivar Mutsu).

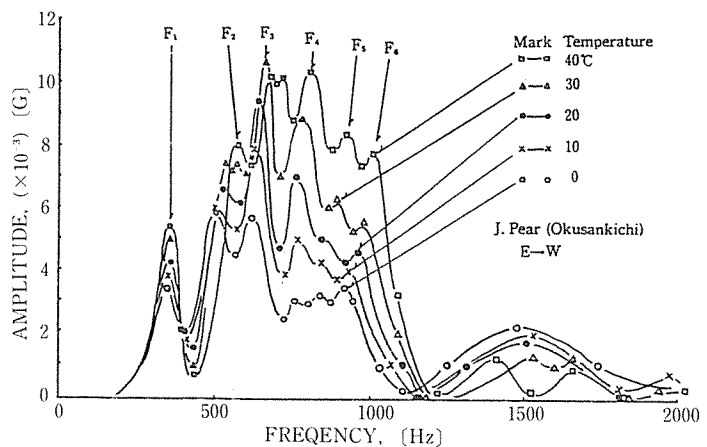


Fig. 8-4 Effect of temperature on the resonance curves of the Japanese pear (cultivar Okusankichi).

振点 F_1 は品温差によるずれが最も小さくかつ振動応答においても最も安定していた。

Fig. 8-6 は、リング（富士）を -20°C に凍結した場合の共振曲線である。凍結前のリングでは、観察される共振周波数は高いところで $4,000\text{Hz}$ から $5,000\text{Hz}$ までであったが、凍結した場合はさらにそれより高い周波数域での共振が現われ、振動応答も強くなった。とくに $9,000\text{Hz}$ 附近で 0.1G という強い共振現象を観察した。

8.3 考 察

品温の違いにより同一の試料でも共振曲線のパターンにかなりの変化が現われた。

例えば、共振の強さはある振動周波数を境にして、これより低域側の共振点では品温が上昇するとともに強くなり、これより高域側の共振点では逆に品温の上昇とともに弱まった。

以上のような低域側と高域側とに分けられる変異点は、本実験に用いた果実においても異なり、リングの場合は富士で 1500Hz から 1600Hz 附近、陸奥で 1300 から 1500Hz 附近、トマトの場合で 1100Hz 附近にみられた。

また、共振周波数にも品温の影響による若干のずれが観察された。しかしながら、これらの結果を総合的にみた場合、品温の変化に対して比較的安定である共振点が発見された。すなわち、リング（富士）の場合は第2番目の共振点 F_2 、その他のものでは最も低い周波数で起こった共振現象 F_1 がそれぞれ品温の変化に対して最も変動が小さく、余り品温の変化に影響されないことを示した。

Tab. 8-9 A, B には、リング（富士）の品温 T と共振周波数 F の関係、品温と共振応答強度の関係をそれぞれ共振点ごとにまとめて示した。

Tab. 8-9 A, B によると、品温は共振周波数に対するより、共振応答に対してより大きく影響していることがわかる。

富士の場合、 $1500\text{Hz} \sim 1600\text{Hz}$ より低い周波数域では品温の上昇とともに共振周波数は低域

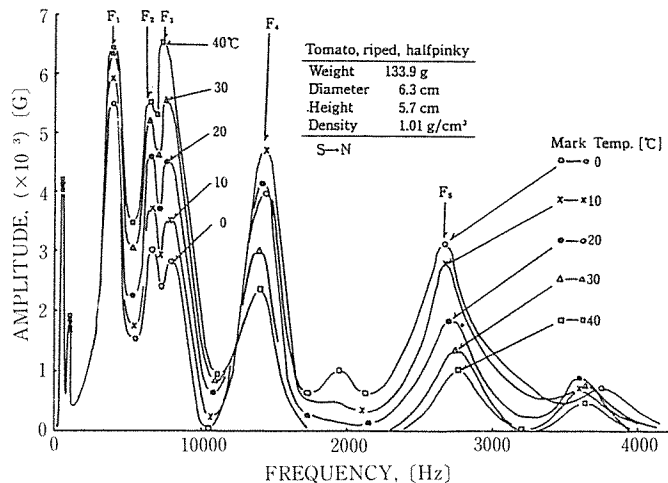


Fig. 8-5 Effect of temperature on the resonance curves of the tomato (cultivar Tohkoh).

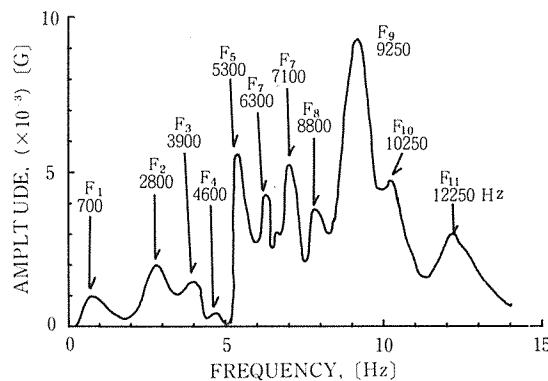


Fig. 8-6 Resonance curve of a frozen apple, cultivar Fuji.

Tab. 8-9A Regression analysis, —fruit temperature and shift of resonant frequency—
Sample, apple (cultivar Fuji)

F	B	A	r
1	-0.18	788.00	-0.829*
2	-0.14	1242.00	-0.493
3	-0.18	1405.60	-0.775
7	2.02	2707.00	0.929*
F=BT+A			

Tag. 8-9B Regression analysis, —fruit temperature and resonant amplitude—

F	B	A	r
1	0.88	188.00	0.991**
2	1.09	132.00	0.963*
3	2.22	143.00	9.951*
7	-5.44	346.00	-0.998*
F=BT+A			

側へ移行し、1500Hz～1600Hz より高い周波数域では共振点（たとえば F_7 ）が高域側へ移行している。しかしながら、これらの現象の中で有意な相関が認められたのは F_1 の -0.829 と F_7 の 0.929 のみであった。

共振強度は、品温が上昇するにつれて変異点より低域側の周波数では応答がよくなり、大きく現われたが、高域側の周波数では逆に応答が小さく現われた。

陸奥の場合も共振強度については富士の場合とほぼ同じ傾向であったが、共振周波数については品温の影響は小さく、不明瞭になった。

Tab. 8-10 および B は、陸奥に対する実験結果およびその解析結果をまとめたものである。これらの結果から、果実の共振周波数等の測定のための品温は 20～30℃ の範囲が好ましいといえることができる。すなわち、20℃ 以下では第 1 次あるいは第 2 次の共振応答が小さくなるし、逆に 30℃ 以上では共振応答が大きくなり、共振現象が検出し易くなるとしても作業環境あるいは果実の品質管理上好ましくないので実際上は不適當であろう。

Tab. 8-11 はナシ（晩三吉）の品温とその共振周波数、共振強度およびそれらの相関をまとめたものである。

ナシの場合は、1200Hz 附近を境にして、これより低い周波数域では、共振周波数のずれと共振強度に対する品温の影響は正の相関となって表われ、 F_1 を除く他の共振点ではいずれも有意であった。また、1200Hz より高域側にある F_7 の共振点では、共振周波数および共振強度に対する品温の影響は負の相関となって表われたが、有意性が認められたのは共振強度に対してのみであった。

トマトの場合は、1100Hz 附近を境にして、これより低い周波数域では品温と共振強度の関係は正の相関（ F_1 , F_2 , F_3 ）、これよりも高い周波数域では負の相関（ F_4 , F_5 ）を示した。しかし、品温と共振周波数の関係は、 F_3 および F_5 の共振点を除けば有意な相関ではなかった。

Tab. 8-12 はトマトの品温と共振周波数および品温と共振強度の関係をまとめたものである。

Tab. 8-12 に示すように、 F_3 では品温の上昇とともに共振周波数がより低域へ移行する負の相関、 F_5 では逆に高域側へ移行する正の相関であった。トマトの場合も他と同様に、 F_1 に対する品温の影響は小さく、 F_1 が最も安定した共振点であることを示した。

Tab. 8-10A Effect of fruit temperature on the resonance frequency and the amplitude — apple, cultivar Mutsu —

		0 °C	10	20	30	40
F ₁	F	625 Hz	628	630	629	628
	Y	162 gal	168	181	200	212
F ₁	F	674	676	675	675	672
	Y	134	121	127	140	155
F ₂	F	950	956	963	957	963
	Y	103	108	118	140	189
F ₃	F	2067	2073	2083	2055	2061
	Y	222	203	167	103	52

Tab. 8-10B Regression analysis, —effect of fruit temperature on the resonance frequency and the amplitude—
apple, cultivar Mutsu

F		B	A	r
F ₁	F	0.07	630.1	0.592
	Y	1.32	158.2	0.087**
F ₁	F	-0.05	675.4	-0.521
	Y	0.61	123.2	0.737
F ₂	F	0.27	952.4	0.783
	Y	2.04	90.8	0.919**
F ₃	F	-0.22	2071.4	-0.315
	Y	-4.40	237.4	-0.982**

F, Y=BT+A

Tab. 8-11 Effect of fruit temperature on the resonance frequency and the amplitude — J. pear (cultivar Okusankichi) —

		0 °C	10	20	30	40	r	0.100* 0.050**
F ₁	F	345 Hz	353	361	369	355	0.633	
	Y	38 gal	32	43	51	54	0.889*	
F ₂	F	499	510	529	540	577	0.971*	
	Y	60	60	66	75	80	0.965*	
F ₃	F	621	638	648	666	683	0.996**	
	Y	57	79	94	106	102	0.956*	
F ₄	F	767	763	764	783	808	0.844**	
	Y	30	50	70	83	103	0.998**	
F ₅	F	845	842	845	981	920	0.893*	
	Y	32	42	50	62	83	0.980**	
F ₆	F	921	934	966	986	1007	0.993**	
	Y	34	40	46	55	78	0.949**	
F ₇	F	1490	1550	1520	1540	1410	-0.477	
	Y	25	21	17	12	11	-0.986**	

Tab. 8-12 Effect of the temperature on the resonance frequency and the amplitude
——tomato (cultivar Tohko)——

F	0°C	10	20	30	40	0.100* 0.050**
1	F 408 Hz	403	401	405	411	0.318
	Y 55 gal	59	64	64	64	0.890*
2	F 672	676	667	671	665	-0.695
	Y 30	37	46	52	55	0.987**
3	F 786	783	759	759	733	-0.954**
	Y 28	35	45	55	65	0.998**
4	F 1449	1449	1401	1386	1424	-0.632
	Y 40	47	41	30	33	-0.842*
5	F 2680	2688	2704	2742	2786	0.957*
	Y 31	28	18	13	10	-0.980**

以上のように、果実の共振曲線における共振周波数および共振強度に対する品温の影響は、ある周波数を境にしてそれより低域側と高域側の周波数域においてはそれぞれ逆に作用することがわかった。

また、 -20°C で凍結したリング（富士）に対する同様の共振実験は、凍結前にはみられなかった非常に高域の周波数で共振点が多数、しかもかなり強い応答で検出された。この場合、品温が低くなると高域の共振強度が大となる傾向は凍結前の実験で観測された結果の延長としても考えられるが、凍結した果実は、その組織内水分が凍結固化し、もはや氷の球体に近い状態になって、非常に高いヤング率をもった球体と同様の共振様相を呈したものと考えられる。

第9章 果実の共振現象における位相差と物性

質点のある粘性減衰系の正弦波外力による強制振動においては、その質点の振動が外力の位相より遅れて生ずることが仮定されて、その振動方程式が立てられている。

音波共振法においては、供試果実に対する刺激音源の周波数を増加していくと、その音源周波数は果実の固有振動数と一致する。このときに果実の共振現象が生ずるが、同時に音源波と検出波の間には位相差が生じている。この位相差は振動検出器の質量及び果実自体の振動伝達速度が関係しているものと思われる。すなわち、果実については、その物性つまり密度、粘性、かたさなどが共振時の位相差と関係があり、結果的には果実の熟度が位相差と密接に関連するものと予想される。

9.1 材料及び方法

実験材料は市販の柿（富有）、ナシ（新興）、リング（富士、陸奥、紅玉、スターキング）、および佐賀大学農学部附属農場産の温州ミカン、トマト、そしてカリンである。

実験装置は Fig. 9-1 に示すような共振装置を利用し、ピックアップにはクリスタル形（ロッシェル塩）を用いて試料の振動を検出、オシロスコープの Y 軸に接続した。オシロスコープの X 軸には発振器からスピーカへの音源入力信号を接続した。

入力信号と検出信号をオシロスコープ（松下製、VP-525A）のブラウン管に描かせて、果実

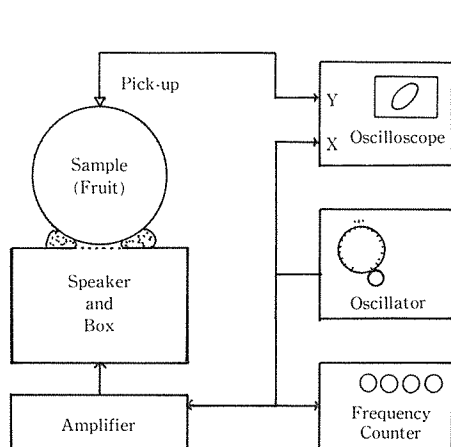


Fig. 9-1 Schematic diagram of measurement instrument.

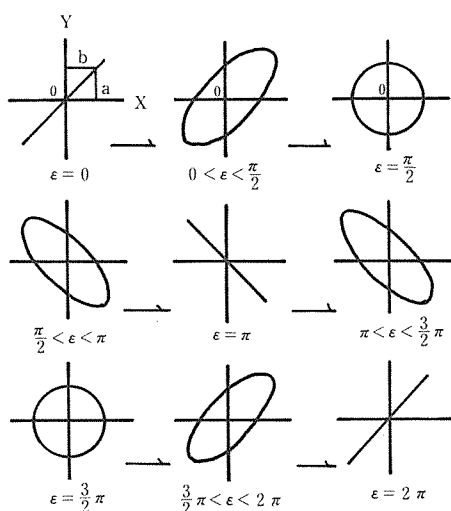


Fig. 9-2 Lissajous and phase difference.

の共振時におけるX軸信号とY軸信号との位相差を読みとり、そのときの共振振動数を周波数カウンタで読みとった。

Fig. 9-2 には、果実の共振時における音源入力(X)とその共振振動検出力(Y)によるリサーチ図形およびその図形に対する位相差を示している。

9.2 結果及び考察

9.2.1 検出器自体の位相遅れ（位相差）

使用したクリスタル型検出器の構造がアルミ箔の振動板で振動を受け、これをクリスタル形ロッシェル塩に伝達するシステムをとっているため、検出器自体に若干の位相差がみられた。この位相差は2000Hz までの振動に対して約 2π 程度であった。

この位相差を除去もしくは小さくするためアルミ箔を除去し、試料の振動を直接にロッシェル塩板に伝達するようにした。この方法をとると検出器自体の位相差は生じなくなった。

9.2.2 起振方向と位相差

果実の種類によって、それぞれ異なった位相差を示したが、また同一試料においても起振方向の違いによってかなり異なった位相差を示した。Fig. 9-3 にそれらの測定例を示している。

Fig. 9-3 によると、種子のあるカキでは音源位置、すなわち起振方向(S-N, E-W)により音源とピックアップ間の位相差にかなりの差異がみられるが、種子のない温州ミカンでは位相差に大きな差異はみられなかった。

9.2.3 果実の大きさ並びに熟度と位相差

起振中の刺激源と検出点との位相差は、同一物質に対するものであっても、その物質の形状あるいは大きさなどによって異なることは十分に予測されるところである。逆に、同じ形状、大きさの物体でもその構成する物質の性質により位相差がそれぞれ異なってくることも、固有振動数の場合と同様であり、十分に考えられることである。

Fig. 9-4 は果実の大きさが音源と検出点との位相差の大小に与える影響及び果実の熟度がその位相差の大小に与える影響の実測例を温州ミカンとトマトについて示したものである。Fig. 9-4 の(A)及び(B)の温州ミカンの場合は果実の大きい方が音源周波と検出周波との間の位相差が

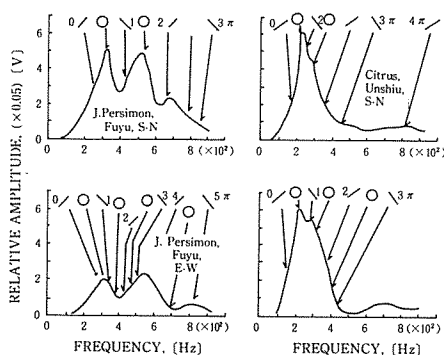


Fig. 9-3 Effect of driving direction on the phase difference between the sonic source and the pickup on the opposite side a fruit.

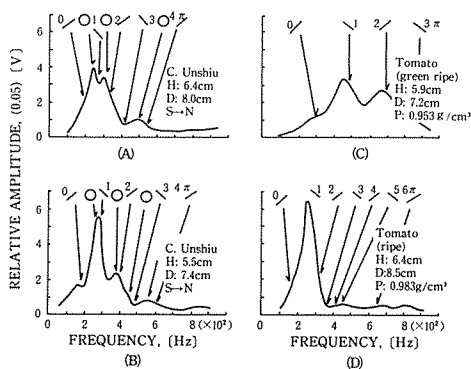


Fig. 9-4 Effects of the size and the ripeness of fruits on the phase difference between the sonic source and the pickup.

大となっている。Fig. 9-4 の(C)及び(D)のトマトの場合は、それぞれ未熟果(緑色)及び熟果に対する測定例である。未熟果の位相差より熟果の位相差が顕著に変化し、位相の遅れ速度(位相差 π /変化周波数 Δ Hz)が大であることを示した。

9. 2. 4 品種と位相差

果実の種類の違いによって共振時の位相時の位相差は異なるが、果実の品種によってもその品種間に位相差の差異が生じた。

Fig. 9-5 は数品種のリンゴとカリンについての位相差を共振曲線上で示したものであるが、同じリンゴでもその品種間でそれらの位相差にかなりの差異があることを示している。

紅玉とスターキングにおいては700Hz以上の周波数でも 2π 以上の位相差はみられなかったが、陸奥と富士では900Hzで 3π の位相差が観察された。しかし、これらも起振周波数を増加して1100Hz以上の周波数を与えても位相差は 4π 以上にはならなかった。

一方、比重量が約 $1.2\text{g}/\text{cm}^3$ と一般の果実と比較するとかなり大であるカリンの位相差を実測したところ、位相差は非常に小さく、1,700Hzで 2π であった。1,700Hz以上の高域周波数でも 2π 以上の位相差はみられなかった。

Fig. 9-6 は収穫直後のナシ(新興)と収穫後かなり追熟が進行した状態の市販のナシ(新興)についての共振曲線と位相差を示したものである。

ナシの場合、追熟が進行したものの位相差の変化の間隔は収穫直後の新鮮果のものより小さく、起振源に対する検出点の位相遅れ速度はか

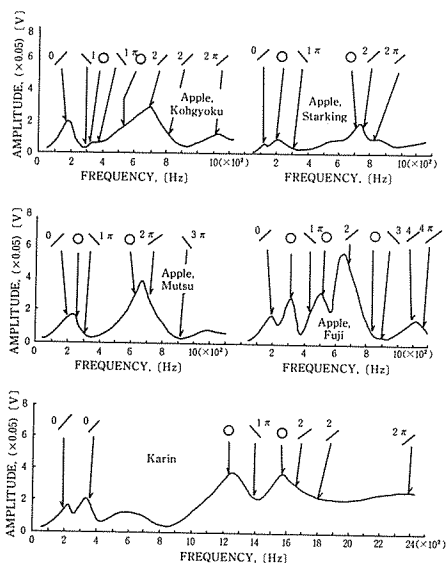


Fig. 9-5 Effects of the cultivar of the fruits on the phase difference between the sonic source and the pickup.

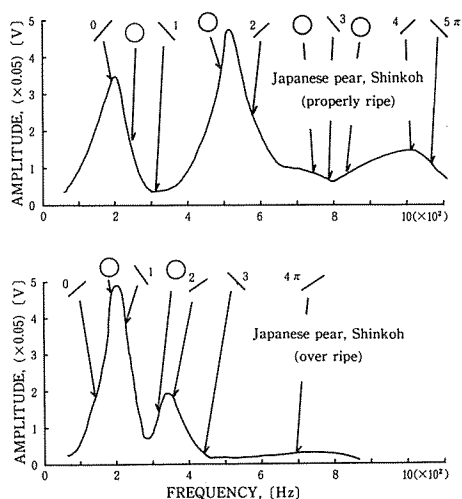


Fig. 9-6 Resonant curves and the phase difference to see the effect of the stage of ripeness of the fruit, J. pear, cultivar Shinkoh.

なり大となることが判明した。

また、Fig.9-7 はハウスメロン(品種、エリザベス)の共振曲線と位相差の実測例であるが、メロンの場合は比較的小さい周波数間隔で位相差が変化して、位相の遅れ速度が大きいことを示した。

9.2.5 位相の遅れ速度

位相差は周波数の増大とともに大となり、相互に密接な相関が予測される。かつまた、位相の遅れ速度(変化させる起振周波数の増分に対する位相差 π , $\pi/\Delta\text{Hz}$)が、産物の種類、品種、大きさ、熟度などによってもかなり影響を受けていることも明らかであった。これらの結果に基づいて起振周波数とそのときの位相差の関係を Fig. 9-8 から Fig. 9-10 に図示した。

Fig. 9-8 は温州ミカンの起振周波数と位相差の関係である。起振周波数500Hz から600Hz 附近で、およそ 4π の位相差がみられ、この点までの起振周波数と位相差との関係はほぼ一次関数の関係であった。しかし、600Hz 以上の高い周波数の音波で起振しても位相差は 4π より大きくはならなかった。

また、ミカンの場合は音源位置すなわち、起振方向を変えた場合でもそれらの位相差には有意な差はみられなかった。しかし、果実の大きさについては、位相差に多少の影響を与えていることが明確に認められた。

Fig. 9-9 はトマトについての実測結果をまとめて図示したものである。緑熟果及び完熟果における起振周波数と位相差の関係をみると、それら緑熟果と完熟果との間には明確な差異が認められる。すなわち、完熟果の場合は起振周波数の増加分に対する位相差が大きく、比較的小さい周波数間隔で位相の変化がみられる。一方、緑熟果の場合は前者と比較すると起振周波数の増分に対する位相の遅れは小さく、かなり緩やかな変化で進行している。

Fig. 9-10 は、ナシの実測例からその起振周波数と位相差の関係を示したものである。新鮮適

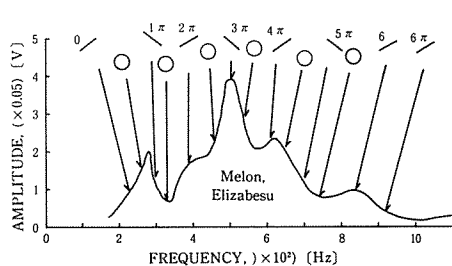


Fig. 9-7 Resonant curve and phase differences of the melon fruit, cultivar Elizabeth, at edible stage.

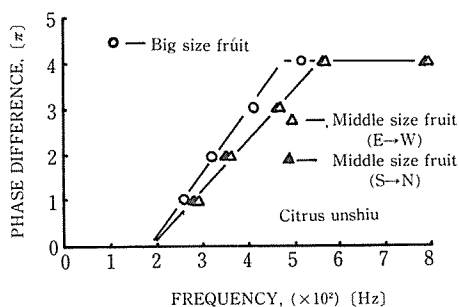


Fig. 9-8 Relationship between the phase difference and the frequency on the fruit, citrus unshiu.

熟果と収穫後数日経過した過熟状態の果実の位相差一周波数曲線であるが、過熟状態の果実は新鮮適熟果に比較して、明らかに位相差が大となっていることが判明した。

Fig.9-11 はカキの起振周波数と位相差の関係を示したものである。カキの場合は種子があること、形状がだ円（偏平）体であることなどが大きく影響したためか、起振方向によって位相差に差異が生じた。

以上のことをまとめると以下ようになる。

まず、果実振動の検出波の位相は起振周波数の増加に伴い、その遅れが大きくなる。

次に、その位相差の大きさは、果実の種類・熟度等で異なるが、最大 2π から 6π ラジアンにも達する。すなわち、非常に硬く、かつ比重量が 1.2 g/cm^3 前後もあるカリンの場合、およびリンゴの紅玉とスターキングの場合ではその位相差は最高で 2π までしか観察できなかった。しかし、リンゴでも陸奥および富士ではそれぞれ 3π および 4π 、トマトでは緑熟段階で 3π 、完熟段階で 6π までの位相差が観察できた。

さらに、起振周波数の単位増分当りの位相遅れは果実の種類、品種、大きさ、熟度および起振方向などによって大きく影響される。

したがって、果実の種類・品種毎にその熟度と位相差の関係を明らかにすれば、熟度判定に位相差を利用することができると考える。

第10章 パルス法による果実の物性測定

本章では果実のパルス音波に対する応答特性を調査することによって、果実内部における音速やヤング率などの物性と熟度との関係を解明しようと試みた。

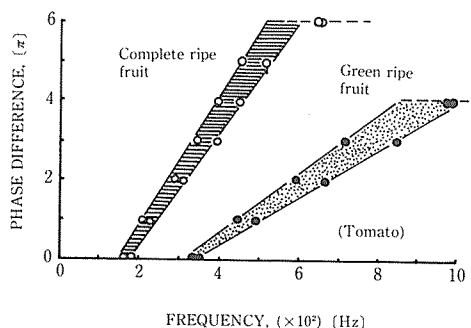


Fig. 9-9 Relationship between the phase difference and the frequency on the tomato fruit, cultivar Tohokoh.

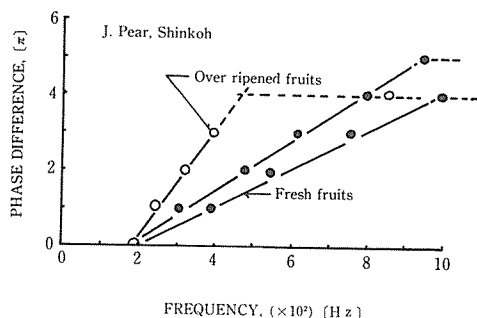


Fig. 9-10 Relationship between the phase difference and the frequency, on J. pear, cultivar Shinkoh.

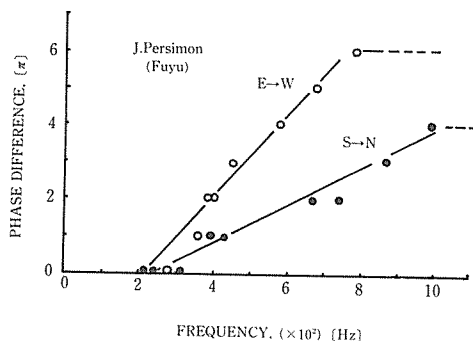


Fig. 9-11 Relationship between the phase difference and the frequency on J. persimon, cultivar Fuyu; in the case of different driving direction.

10.1 材料及び方法

実験材料には市販のトマト、プリンスメロン、ナシ、リンゴ、カキ、ミカン、カリンなど7種20品種を用いた。

実験方法は、起振法として音圧パルスを果実を与え果実内の音速、あるいは振動減衰速度を測定する、いわゆるパルス法を用いた。

発振器によりFig. 10-1に示す6種のパルスを発生させ、これを増幅器で増幅して、スピーカから音波として果実を与えた。Fig. 10-1のパルス波形のうち、主として(a)の波形を利用した。

パルスを与える時間間隔は100msecとして、同じ測定をくり返した。このパルスの時間間隔は予備実験の結果、ほとんどの果実の減衰振動が100msec以内に完全に消滅し、かつ次のパルスにより生ずる果実の振動に与える影響がなかったこと、およびオシロスコープでの観察が最も安定的であったことなどにより選択されたものである。

パルス音波を果実に与えて得られる果実の自由減衰振動曲線をオシロスコープに映し出させ、こ

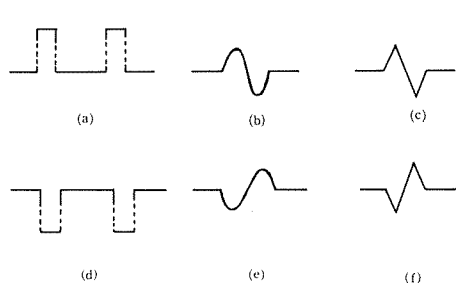


Fig. 10-1 Wave patterns of pulse.

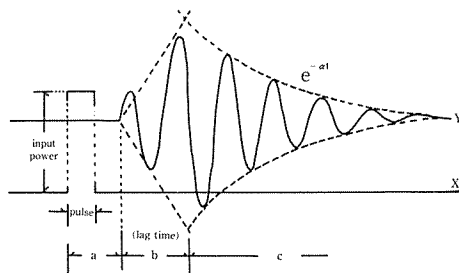


Fig. 10-2 Pulse and damped vibration curves.

れを写真撮影して解析した。Fig. 10-2にパルス振動法から得られる果実の減衰振動のパターンと解析に必要な点を示す。図に示すように、果実を与えるパルス波と果実の振動が起こり始める点までの距離から音波の伝播時間 a を求め、この時間からスピーカと果実との間の距離分を考慮した果実内音波伝播時間 a' 、あるいは伝播速度(果実直径 d / a')、果実の最大振動振幅までの立ち上がり時間 b 、振動の減衰速度、減衰比、減衰定数および果実の固有振動数などを求めた。

果実に対するパルス音波刺激実験にあたっては、果実の減衰振動パターンはパルス音波の強弱により変化しないことを確かめ、最も測定に適したパルスの強さ、検出感度に器機を調節しながら測定した。

一般に振動エネルギーの消散には、空気粘性、振動物体内部の粘性に基づく粘性減衰抵抗によるもの、物体内部の弾塑性の性質によるひずみ-応力関係のヒステリシスに基づく損失エネルギーによるものなどがあり、複雑な性状を呈する。したがって、これら消散エネルギーの量的評価については、未だ不明の点が多く、実際の振動を取り扱う場合には対象物と同種のものに対する振動実験結果から、減衰の大きさを推定する必要がある。

減衰振動系ではFig. 10-3のように考えると、復元力は $-ky$ 、減衰力は $-cy$ であるから、

$$-\frac{w}{g} \cdot \ddot{y} - c\dot{y} - ky = 0 \quad \dots\dots\dots (10-1)$$

で表わされる。これを単位質量当りに変形すれば、

$$\ddot{y} + \frac{g \cdot c}{W} \dot{y} + \frac{g \cdot k}{W} y = 0 \quad \dots\dots\dots (10-2)$$

$$\left. \begin{aligned} 2\varepsilon &= \frac{g \cdot c}{W} = \frac{c}{m}, \\ n^2 &= \frac{g \cdot k}{W} = \frac{k}{m} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (10-3)$$

として,

$$\ddot{y} + 2\varepsilon \dot{y} + n^2 y = 0 \quad \dots\dots\dots (10-4)$$

が得られる.

式 (10-4) において ε と n の比 ε / n は無次元の量であり, この比を減衰定数 h という.

$$h = \frac{\varepsilon}{n} = \frac{c / 2m}{\sqrt{k / m}} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad \dots\dots\dots (10-5)$$

したがって, h は減衰係数 c とばね定数 k および質量 m の関数であり, いかなる振動系でも h の大小によってその振動減衰の状態が定まる. 一般には c の値を求めることが困難で, h の値が振動実験から求められている.

この減衰定数 h を用いて, 式 (10-4) は次のように表わされる.

$$\ddot{y} + 2hn\dot{y} + n^2 y = 0 \quad \dots\dots\dots (10-6)$$

この式から明らかなように, 減衰振動は減衰のないときの固有振動数 n と減衰定数 h の二つの量で規定される.

式 (10-6) の解として, $y = e^{pt}$ とおき, 特性方程式

$$p^2 + 2hnp + n^2 = 0 \quad \dots\dots\dots (10-7)$$

を作ると, この式の 2 根は次のようになる.

$$p = -hn \pm n\sqrt{h^2 - 1} \quad \dots\dots\dots (10-8)$$

そして, p の値は $h > 1$, $h = 1$, および $h < 1$ の 3 つの場合が考えられる. すなわち, $h > 1$ であれば振動しないし, $h = 1$ であれば振動するかどうかの境界の減衰となり, $h < 1$ であれば振動する.

減衰振動 ($h < 1$) の場合は, 式 (10-8) より, p は二つの相異なる複素根を有する.

$$\begin{aligned} p &= -hn \pm in\sqrt{1 - h^2} \\ &= -hn \pm in' \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (10-9)$$

ただし, $i = \sqrt{-1}$, $n' = n\sqrt{1 - h^2}$

したがって, 式 (10-6) の一般解は次の式で与えられる.

$$y = ce^{-hnt} \cos(n't - \varphi) \quad \dots\dots\dots (10-10)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ここに, } c &= \sqrt{A^2 + B^2}, \\ \tan \varphi &= B / A \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (10-11)$$

固有周期 T' は,

$$T' = \frac{2\pi}{n'} = \frac{2\pi}{n\sqrt{1 - h^2}} > \frac{2\pi}{n} \quad \dots\dots\dots (10-12)$$

となり, 減衰のため周期が長くなる.

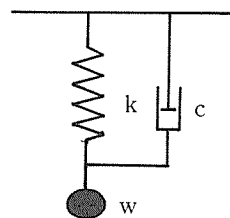


Fig. 10-3 Model of damped vibration.

また、減衰が始まって、同位相の m 番目の極値は、

$$y_m = C e^{-h n t m} \cos(n' t m - \varphi)$$

同位相の $(m+1)$ 番目の極値は、

$$y_{m+1} = C e^{-h n (t m + T')} \cos\{n' (t m + T') - \varphi\}$$

であるから、 y_m と y_{m+1} との比は

$$\begin{aligned} \frac{y_m}{y_{m+1}} &= e^{h n T'} = e^{2 \pi h n / n'} \\ &= e^{2 \pi h / \sqrt{1-h^2}} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (10-13)$$

この比を減衰比といい、自然対数をとると、この値が対数減衰率となり、次式で示される。

$$\lambda = \log e \left| \frac{y_m}{y_{m+1}} \right| = \frac{2 \pi h}{\sqrt{1-h^2}} \quad \dots\dots\dots (10-14)$$

10.2 実験結果

10.2.1 音波の果実内伝播速度

実験に供した果実の音波伝播速度に関する測定結果をトマト、メロン及びカリンについて Tab. 10-1 に示す。

トマトの熟果における音速は50~60m/sであり、これより大きな値の音速のものはその多くが未熟果であった。

Tab. 10-1 Velocity of sonic wave in the fruit fresh.

Product	Mean dia (cm)	Velocity (m/s)	Density (g/cm ³)
Tomato	5.5~9.4	100~50	0.93~0.97
Melon			
Prince	8.3	66	0.96
Shinju	13.2~15.2	36~33	0.94
Earl's Fav.	12.4~13.4	43~37	0.99
Karin	8.9~9.4	336~278	1.20

メロンでは、3品種について音速を測定したところ、品種間に差異がみられた。Tab. 10-1 に示したように真珠が36~33m/s、アールスフェボリット夏系7号が43~37m/s、プリンスが66m/sであった。

さらに密度の大きいカリンの場合、278~336m/sとなった。

10.2.2 減衰曲線

減衰曲線を求めるに際し、実験に供した果実の物理的性質を重さ、密度、大きさについて測定した。その結果を Tab. 10-2 に示す。

Tab. 10-2 に示した果実を共振測定用の果実支持台に載せ、この果実に下部よりパルス音波を与え、上部に接着したロッシェル塩クリスタルピックアップにより減衰振動曲線を測定した。その一部の結果について Fig. 10-4、及び Fig. 10-5 に示す。

Fig. 10-4 及び Fig. 10-5 は、縦軸に振幅を対数値で取って、横軸には時間を取って表わしたも

Tab. 10-2 Characteristics of experimental materials.

Product	Weight g	Density g/cm ³	Dia. cm	Height cm	Note
J. Pear Shinkoh	404 ~ 450	0.908 1.019	9.35 ~9.80	8.3 ~8.9	fresh ~old
J. Persimon Fuyu	309.9	0.982	9.2	6.4	suitable to eat
Apple Mutsu	352.8	0.833	9.0	8.6	suitable to eat
Fuji	335.7	0.833	9.2	8.5	
Starking	319.6	0.844	9.1	7.8	
Citrus Hassaku	411.3	0.898	9.8	8.3	fresh
Amanatsu	332.0	0.845	9.5	7.9	fresh
Unshiu	83.9	0.916	7.4	6.2	
Tomato	45.2 ~124.7	0.942 ~0.971	4.2 ~6.0	4.0 ~5.7	green ~mature

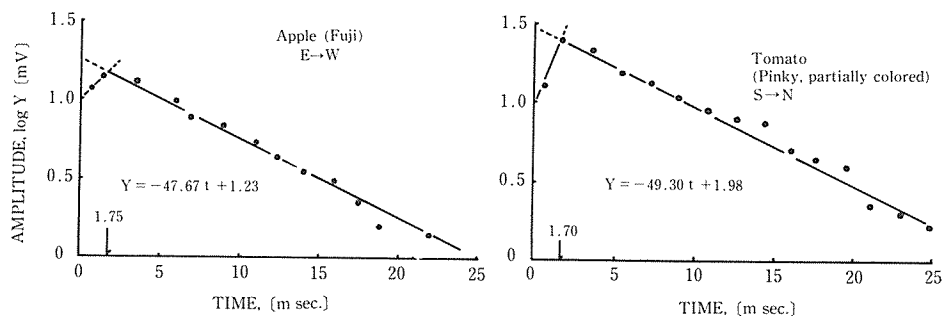


Fig. 10-4 Damping velocity of the free damped oscillation of an apple and a tomato fruit.

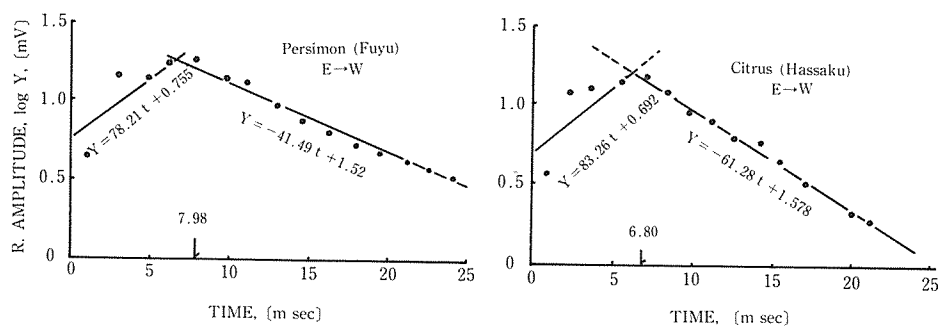


Fig. 10-5 Damping velocity of the free damped oscillation of the fruit, J. persimon (Fuyu) and citrus (Hassaku).

のであるが、この曲線が果実の自由減衰振動の減衰速度を表わしている。そして、この減衰速度は、果実の種類、品種、熟度等により大きな差異を有することを示した。

10.3 考 察

10.3.1 ラグタイムについて

薄いセロハン膜にスピーカからパルス音波を与えると、パルスの音圧の力がそのまま膜に伝達され、膜の振動エネルギーとなる。振動の大きさも最初の変位において最大振幅となり、その後順次減衰した。しかし、原形のままの果実では、パルス音波を与えるとこれに応じて果実は数回の振動をくりかえして後、その振動の最大変位の出現を観察できた。

この最大変位の出現までの時間 b (Fig. 10-2 の中の b) をここでラグタイムと仮称することとする。このラグタイムにも果実の種類、品種あるいは熟度により差異がみられた。

ラグタイムの長いものとしては、カキ(富有)、八朔、甘夏、温州ミカンなどがあり、ラグタイムの短いものとしては、カリン、リング、プリンスメロン、新鮮な早どりのトマト、及び $N \rightarrow S$ 方向にパルスを与えた場合のカキ(富有)などがあつた。

Fig. 10-4 に示したリングの場合と新鮮な早どりトマトの場合はパルスの発振から果実の最大振幅までの立ち上がり時間(ラグタイム)は、約 1.7msec で、非常に短かった。しかし、 $E \rightarrow W$ 方向にパルス波を与えた場合のカキ(富有)及び柑橘の八朔は Fig. 10-5 に示すようにかなりラグタイムが長くなった。

一方、減衰速度の大きさは柑橘(八朔)、トマト、リング、カキ(富有)の順であり、やわらかいものほど早く減衰することを示した。

このように、パルス波による果実の起振及び自由減衰振動の現象は一般には Fig. 10-6 に示すようなパターンで観察された。すなわち、パルスの音圧を果実に与えると、果実には急激な応答振動が現われ(Fig. 10-6, a 点)、次にその振動は漸次強まりながら最大変位の振動に達する($a \rightarrow b$)。

パルス信号発信時の原点 0 から a までの時間 a' (スピーカと果実間の距離を考慮)で、果実の音波伝播方向の果実直径を除すと、果実内の音波伝播速度を求めることができる。

また、音波の伝播速度からは、その果実のヤング率を求めることができる。つまり、音波の伝播速度 V_p は果実の直径を d 、音波の伝播時間を t とすれば、

$$V_p = \frac{d}{t} \quad \dots\dots\dots (10-15)$$

で表わせる。

さらに、音波の波長 λ が次の条件

$$2d = \lambda, \frac{1}{2}\lambda, \frac{1}{3}\lambda, \dots, \frac{1}{n}\lambda, \quad \dots\dots\dots (10-16)$$

のときに共振が起こるとすれば(両端自由)、共振周波数 f_n は次式で表わせる。

$$f_n = \frac{V_p}{\frac{1}{2} \cdot 2d} = \frac{n}{2d} \cdot V_p = \frac{n}{2d} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \dots\dots\dots (10-17)$$

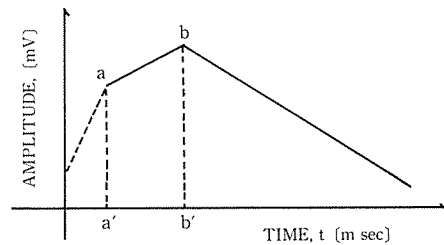


Fig. 10-6 Pattern of damped vibration of a fruit in the pulse test.

ここで、 E は果実のヤング率、 ρ は果実の密度、 n は正の整数である。すなわち、ヤング率 E は、

$$E = \frac{1}{n^2} \cdot 4\rho d^2 f_n \quad \dots\dots\dots (10-18)$$

で与えられる。しかし、近似球体でしかも非均質な果実に対しては、このまま応用できるかどうか疑問もある。Cooke 及び Rand (1973) は、均質等方球体の固有振動数に次のような無次元振動数 s を導入した。

式 (10-17) から

$$n = 2d \cdot f_n \cdot \sqrt{\frac{\rho}{E}} = 4rf_n \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad \dots\dots\dots (10-19)$$

として、この両辺に $\pi/2$ を乗じ、

$$\frac{n\pi}{2} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot f_n \cdot \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad \dots\dots\dots (10-20)$$

さらに、 $s = n\pi/2$ 、 $w = 2\pi f_n$ とすると次式のようなになる。

$$s = w \cdot r(\rho/E)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (5-9)$$

ここで w は角速度 (rad/sec)、 r は外半径 (cm) である。 s は Spheroidal な共振様式ではその球体のポアソン比 μ によって影響されるため、球体のポアソン比に対する振動様式をみつ、それに対する s の値と固有振動数 f_n あるいは角速度 ω 、半径 r および密度 ρ を次式に代入してヤング率を求める (第5章, Tab. 5-1, Tab. 5-2 参照)

$$E = \frac{r^2 \cdot w^2 \cdot \rho}{s^2} \quad \dots\dots\dots (10-21)$$

ここでは、音波伝播速度 V_p から、式 (10-15) および式 (10-17) により求めた概略的ヤング率の値を数種の果実について求めてみた。

トマト (未熟～熟)	96.2～23.8 kg/cm ²
メロン	
プリンス (新鮮)	42.5 kg/cm ²
真珠	12.4～10.4 kg/cm ²
アールスメキシコ 7 号	18.0～14.1 kg/cm ²
カリン (未熟～)	1386.0～95.8 kg/cm ²

10.3.2 減衰定数について

一般に減衰定数が小さくて自由振動が長続きする果実は、鋭く強い共振ピークを有するが、減衰が早いものは共振ピークがなだらかな山形を呈する。また、減衰定数は粘性係数 c と関係があり、 c が大になるにしたがい減衰定数 α も大となってくる。この関係をトマトの熟度の違いについて整理してみると Fig. 10-7 のようなパターンで示された。すなわち、熟度が進むにつれて振動強度が強まり、振動の減衰速度も大となり、熟度の進行とともに粘性係数 c が大と

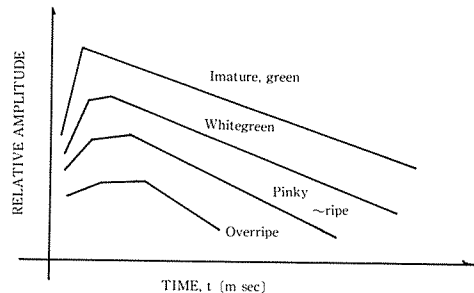


Fig. 10-7 Damped curves of tomato fruits in growing and ripening stages.

Tab. 10-3 Lagtimes, damping slopes, damping ratios, logarithmic decrements and damping constants from the damped vibration curves of some fruits to pulse sonic.

$$Y = a \cdot e^{-\alpha t} \sin \omega t \rightarrow -\alpha, Y_m/Y_{m+1},$$

$$\log_e |Y_m/Y_{m+1}| = 2\pi h \sqrt{1-h^2} \rightarrow h$$

products		Latime (10 ⁻³ sec.)	$-\alpha$	Y_m/Y_{m+1}	h	f_n (Hz)
J. Pear, Shinkoh		1.92	124.2	1.221	0.0314	477
(E→W)		~	~	~	~	~
fresh old		6.60	164.6	2.083	0.1160	239
Apple						
(E→W)						
Fuji		1.75	108.6	1.427	0.0565	302
Starking		1.63	129.3			759
J. Persimon						
Fuyuu	E→W	7.98	95.6	1.394	0.0528	305
	N→S	1.77	207.4	—	—	503
Citrus						
Hassaku	E→W	6.80	141.1	1.498	0.0642	303
	N→S	6.95	138.4	1.510	0.0655	223
Tomato (N→S)						
green		1.33	113.5	1.379	0.0511	475
mature		2.03	183.4	1.4805	0.0625	289

なることを示すものである。

ラグタイム、減衰速度、減衰比、減衰定数及び固有振動数について実験に供した代表的果実をまとめると、Tab. 10-3 のようであった。Tab. 10-3 にも明らかなように、それぞれの測定項目にはっきりした影響を与えている要因として果実の新鮮さ及び熟度が上げられる。その他の要因としてパルス発信方向(E→Wか、あるいはN→Sか)、あるいは果実の種類、品種などが考えられるが、Tab. 10-3 に示した結果にも上記の要因の影響がみられる。

以上の実験考察からも明らかなように、パルス音波に対する果実の減衰振動パターンを解析することにより、果実の物性を把握することも可能である。したがって、果実の非破壊的物性測定法としてパルス音波法の応用も十分考えられうる。

・ 第11章 総 括

本論文は生鮮農産物の物理的性質、特に果実の力学的性質についての基礎的実験研究をとりまとめたものである。特に、音波に対する果実の動的挙動とその振動様相を果実表面多数での実測により明らかにした。

本論文の前半、第5章の第1節までは、準静的な外力を個々の果実に与え、果実が破壊に至るまでの力学的特性をプランジャ貫入法、平板でのロードサイクルそしてクリープ復元試験により調査し、次のようなことを明らかにした。

- 1) プランジャ貫入試験においては、果実の破壊力、破壊エネルギー及び破壊点までの変形量はプランジャ直径が大きくなるほど大となる。しかし、プランジャの単位面積当りの貫入(破壊)エネルギー、貫入応力及びヤング率は、プランジャ径が大きくなるほど小さくなる。
- 2) 貫入力及びヤング率は圧縮速度が大きくなるほど大となる傾向がみられたが、一般の準

静的な圧縮速度 (4~100mm/min) の範囲では、果実自体の個体差が大きいため上記傾向に有意性は認められなかった。

- 3) 外力-変形曲線上の生物降伏点は、圧縮速度が早かったり、プランジャ径が小さかったり、あるいは果実の種類によっては出現しなかった。
- 4) 果実は部位により、または果実の種類、収穫時期、生育状態によって強度が異なった。
- 5) 平板圧縮においては、果実に加えた負荷とそれに対する果実のひずみの負荷除去後の回復率が果実の内部損傷のよい目安になることを示した。
- 6) 未熟果、熟果、過熟果などの熟度の違いにより、平板によるロードサイクル試験での吸収エネルギーに明確な差異がみられた。また、その吸収エネルギーと平板圧縮における外力-変形曲線の加圧時の勾配とは次のような指数的關係で示され、良い相関を得た。

$$Y = A - X^b$$

ここで、 Y は吸収エネルギー、 A は定数、 X は平板圧縮曲線の勾配、 b は指数定数である。

- 7) 生育中、成熟中及び貯蔵中におけるトマトの力学的性質において、プランジャによる貫入力は減少しつつあったが、貫入点までの変形量は逆に増大しつつあった。

Toughness は生育中から貯蔵中を通してみると収穫時において最も大きくなる傾向がみられた。

クリープ及び復元試験におけるトマトの挙動はスプリングとダッシュポットからなる4要素モデルで表わせた。しかし、未熟果の挙動については永久変形項の粘性 η_3 が他の要素に対して極端に大きいため、外力に対しても無視でき、三要素で表わすことができた。

- 8) 第5章第2節以後第10章までを通じて、果実の生育中あるいは追熟・貯蔵中の物性変化を破壊的及び非破壊的に評価するため、準静的圧縮法と音波共振法の応用を試み、次に述べるような基礎的な事象を明らかにした。

- (1) メロン果実の生育肥大曲線を指数関係式で表わした。
- (2) 生育中のメロンの共振周波数はメロンの肥大成熟とともに次第に低域周波数へ移行した。
- (3) 生育中のメロンには1,000Hz以上の高い周波数域の共振点がみられたが、成熟段階になるとこれはみられなくなった。
- (4) 果実のヤング率は次式により求めた。

$$E = \frac{f^2 Gr^2 \rho}{S^2}$$

ここで、 E はヤング率、 f は Spheroidal 振動様式における基本振動数、 Gr は果実の胴回り、 ρ は密度、 s は無次元振動数でポアソン比 $\mu=0.3$ あるいは 0.5 のときそれぞれ 2.6462 及び 2.6656 である。

メロンの貯蔵中のヤング率の変化は次式で示された。

$$E = -8.182 T + 236.15, \quad 15^\circ\text{C貯蔵区}$$

$$E = -8.422 T + 210.65, \quad 20^\circ\text{C貯蔵区}$$

ここで、 T は貯蔵日数 (収穫後の日数)

貯蔵中の果実は目減りしつつげている。また、ヤング率は膨圧等との関連から目減りと密接な関係があり、次式のように示された。

$$E = -6.994 \cdot WL_{15} + 213.3, \quad 15^\circ\text{C貯蔵区}$$

$$E = -16.27 \cdot WL_{20} + 241.3, \quad 20^\circ\text{C貯蔵区}$$

ここで、 $WL_{15,20}$ は初期重量に対する重量損失率、下添字15及び20はそれぞれ貯蔵温度を示す。

- (5) メロンの色、香り、やわらかさ、なめらかさ、味、総合評価に関する官能試験によって、果実の最適供食時期は収穫後7日から10日の間であると判断された。

9) 非破壊的物性測定法としての音波共振法を研究するにあたり、果実の共振時における共振様相及び様式を明らかにしようと試み、以下のような知見を得た。

- (1) スイカ、トマト、リング及びナシの共振曲線を求め、それらの第1次共振点における果実表面の共振強度分布を求めた。
- (2) ナシ（晩三吉）及びリング（陸奥）については、第1、第2、第3以上の共振点における共振様相を明らかにし、それらの共振様式をそれぞれ ${}_0S_2$ 、 ${}_0S_3$ および ${}_0S_0$ であると同定した。
- (3) 第4次共振点以上の高域周波数における共振様相は非常に複雑で、それらの共振様式を明らかにすることはできなかった。
- (4) リングの共振様式には、 ${}_0S_2$ 共振周波数よりやや高い周波数に ${}_0S_2$ 様式の水平軸を中心に $N-S$ 軸を 90° 回転した共振様式が出現した。この様式を ${}_0S_2'$ と呼称した。 ${}_0S_2'$ は過熟気味のリングによく出現した。

この ${}_0S_2'$ の様式はCookeら(1973)の3媒質モデルの球状体振動様式には予想されていないものであった。

10) 共振実験用の果実の支持台について検討し、次のようなことを明らかにした。

- (1) 果実の共振応答は果実支持台の果実刺激音源面積に比例して大きくなる。
- (2) 音源面積の大小は実験での果実共振周波数の不一致（ずれ）とは無関係である。
- (3) 刺激音源面積の大きさは、供試果実の大きさより適度に小さいほうが好ましい。
- (4) 果実と果実支持台の間の音波が伝播される気柱はエアカップリングを防ぐために気密でないほうがよい。

11) 果実の共振点は果実の品温に影響されることを明らかにした。すなわち、

- (1) 共振強度は品温が高くなるにしたがい、ある周波数を境にしてこれより低域の周波数では大きくなり、これより高域の周波数では小さくなる。
- (2) 共振周波数に対する品温の影響もかなりあるが、共振点によってはその共振周波数と品温との間には有意な相関がみられないほど影響が小さくなる。
- (3) 共振周波数において、最も品温の影響が小さい共振点は、リング（富士）の場合は第2共振点の F_2 、その他の果実では第1共振点の F_1 である。
- (4) 凍結果実の共振曲線は生果では全く現われなかった非常に高い周波数域に強い共振が出現する。このことから、凍結果はヤング率などの物性が生果と全く異なったものになることが予想された。

12) 音波共振法における果実の起振音源と検出振動との間には位相差が生じることがわかった。すなわち、

- (1) 起振音源周波に対する検出振動周波の位相差は起振音源周波数が増加するに従って大きくなった。
- (2) 果実の第1番目の共振は起振音源と検出振動との位相差が $2/5\pi$ から π の間で生じた。
- (3) 位相差は果実の種類およびその熟度によって異なり、最大位相差は 2π から 6π の範囲であった。
- (4) 単位周波数当りの位相差は、果実の種類、品種、大きさ、熟度、音波刺激方向などによ

り変化した。

13) 果実内を通過する音速をパルス法によって求め、その物性値を算出しようと試みた。

果実内音速から、その果実のヤング率を算出した。

パルス音波により励起された果実の自由減衰振動を解析することにより、果実の物性を把握することも可能であることを示した。これにより果実の非破壊的物性測定法として、パルス法の応用も可能であることが判明した。

謝 辞

本研究をまとめるに当って、御懇篤なる御指導および御助言をいただいた九州大学農学部中馬豊教授（現在熊本工業大学）、上本俊平教授及び村田敏助教授に深く感謝の意を表します。

また、終始御激励と御助言をいただいた鹿児島大学農学部石橋貞人教授（現在九州大学）、佐賀大学農学部東野哲三教授をはじめとする佐賀大学農学部の諸先生方に厚く謝意を表します。

引 用 文 献

- 1) Abbot, J. A., G. S. Bachman, R. F. Childers, J. V. Fitzgerald and F. J. Matusik (1968): Sonic Techniques for Measuring Texture of Fruits and Vegetables. *Food Technology*, 22(5): 101-112
- 2) Arnold, P. C. and A. W. Roberts (1969): Fundamental Aspects of Load-Deformation Behavior of Wheat Grain. *Trans. ASAE*, 12(1): 104-108
- 3) Ang, J. K., F. M. Isenberg, and J. D. Hartman (1960): Measurement of Firmness of Onion Bulbs with a Shear Press and a Potentiometric Recorder. *Proc. Am. Soc. Hort.*, 75: 500-509
- 4) Bourn, M. C. (1967): Deformation Testing of Foods(I). *J. Food Sci.*, 32: 601-605
- 5) 中馬豊・村田敏・安部武美・早川功 (1967): 生鮮農産物の輸送損傷に関する研究, *農機誌*, 29(2): 82-87
- 6) 中馬豊・安部武美・早川功 (1967): 生鮮果菜類の輸送損傷に関する研究, *農機誌*, 29(2): 88-91
- 7) 中馬豊・岩元睦夫 (1967): 鶏卵の輸送損傷に関する研究, *農機誌*, 29(2): 98-103
- 8) 中馬豊・泉裕己・松岡孝尚 (1967): 温州ミカンの輸送損傷に関する研究, *農機誌*, 29(2): 104-108
- 9) 中馬豊・村田敏・早川功 (1968): Carton Box 中におけるナシの振動特性, *農機誌*, 30(1): 42-44
- 10) 中馬豊・村田敏・早川功 (1970): リンゴの衝撃加速度の測定と解析, *農機誌*, 32(1): 47-52
- 11) 中馬豊・志賀徹・疋田慶夫 (1977): 振動・衝撃利用による果実の内部品質判定 (第1報), *農機誌*, 39(3): 335-341
- 12) Cooke, J. R. (1972): An Instrumentation of the Resonant Behavior of Intact Fruits and Vegetables. *Trans. ASAE*, 15(5): 1075-1079
- 13) Cooke, J. R. and R. H. Rand (1973): A Mathematical Study of Resonance in Intact Fruits and Vegetables Using a 3-Media Elastic Sphere Model. *J. agric. Engng. Res.*, 18: 141-157
- 14) Davis, H. E., G. E. Troxell and C. T. Wiskocil (1964): The Testing and Inspection of Engineering Materials. Third Edn., McGraw-Hill, N. Y.
- 15) Essex, E. Finney and K. H. Norris (1967): Sonic Resonant Method for Measuring Properties Associated with Texture of Irish and Sweet Potatoes. *Proc. ASHS*, 90: 275-282
- 16) Essex, E. Finney (1967): Dynamic Elastic Properties of Some Fruits During Growth and Development. *J. Agric. Engr. Res.*, 12(4): 249-255
- 17) Essex, E. Finney, I. Ben-Gera, and D. Massie (1967): An Objective Evaluation of Changes in Firmness of Ripening Bananas Using a Sonic Technique. *J. Food Sci.* 32: 642-647
- 18) Essex, E. Finney and K. H. Norris (1968): Instrumentation for Investigating Dynamic Mechanical Properties of Fruits and Vegetables. *Trans. ASAE*, 11: 94-97
- 19) Essex, E. Finney (1970): Mechanical Resonance Within Red Delicious Apples and Its Relation to Fruits Texture. *Trans. ASAE*, 13: 177-180
- 20) Essex, E. Finney (1971): Random Vibration Techniques for Nondestructive Evaluation of Peach

- Firmness. J. Agr. Engr. Res. 16(1): 81-87
- 21) Essex, E. Finney (1971): Dynamic Elastic Properties and Sensory Quality of Apple Fruit. J. Texture Studies, 2: 62-74
- 22) Fritz Forster (1937): Ein Neues Meßverfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls und der Dämpfung. Zeitschrift für Metallkunde, 29(4): 109-115
- 23) Garret, R. E. and R. B. Furry (1971): Velocity of Sonic Pulses in Apples. ASAE Paper No. 71-331 or Trans. ASAE, 15: 770-774
- 24) Goen, E. (1931): Über die Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Stäben mit Hilfe von Biegunsschwingungen. Ann. Physik (B. Folge) 11: p. 649
- 25) 法貴誠・伊藤信孝 (1975): 超音波による大豆の力学的特性, 農機誌, 36(4): 555-558
- 26) 石橋真人・小島孝之 (1969): 農産食品の力学的性質に関する研究 (第1報), 農機誌, 30(4): 231-236, 240
- 27) 石橋真人・小島孝之 (1970): 農産食品の力学的性質に関する研究 (第2報), 農機誌, 32(1): 59-64
- 28) 岩元睦美・河野澄夫・早川昭(1977)青果物輸送の等価再現性に関する研究(第1報), 農機誌, 39(3): 343-349
- 29) Kattan, A. A. (1957): Changes in Color and Firmness During Ripening of Detached Tomatoes, and the Use of a New Instrument for Measuring Firmness.
- 30) 小島孝之・石橋真人 (1970): 農産食品の力学的性質に関する研究 (第3報), 農機誌, 32(2): 145-149
- 31) 小島孝之・石橋真人 (1974): 農産食品の力学的性質に関する研究 (第4報), 農機誌, 32(2): 298-302
- 32) 小島孝之 (1974): 園芸生産物の物性に関する研究(II), 農機学会九州支部誌, 23号 1-13
- 33) 小島孝之 (1975): 園芸生産物の物性に関する研究(I), 農機誌, 36(4): 549-554
- 34) 小島孝之・田中政信 (1976): 果実の熟度判定に関する音波共振法の応用, 佐賀大農彙, 41: 21-29
- 35) 小島孝之・田中政信 (1977): 園芸生産物の物性に関する研究(III), 佐賀大農彙, 43: 83-93
- 36) 小島孝之・中馬豊(1977): 音波共振法による果実野菜の熟度評価 (第1報), 農機学会九州支部誌, 26号: 1-9
- 37) 小島孝之 (1978): 音波共振法による果実野菜の熟度評価 (第2報), 佐賀大農彙, 45: 15-26
- 38) 小島孝之 (1979): 果実の熟度判定に関する音波共振法の応用 (第2報), 佐賀大農彙, 47: 1-10
- 39) 小島孝之 (1980): 果実の熟度判定に関する音波共振法の応用 (第3報), 佐賀大農彙, 49: 1-10
- 40) 小島孝之 (1981): 果実の共振様式および共振様相, 佐賀大農彙, 50: 41-54
- 41) 小島孝之 (1981): 果実の音波共振現象における位相差, 農機学会九州支部誌, 30: 7-12
- 42) Love, A. E. H. (1926): A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity. Dover Pub. Inc., N. Y. : pp 278
- 43) Meyer, L. H. (1965): Food Chemistry. Charles E. Tuttle Company, Tokyo, pp 283-288
- 44) Mohsenin, N. N. (1963): A Testing Machine for Determination of Mechanical and Rheological Properties of Agricultural Products. Penn. Agr. Exp. Sta. Bull., 701
- 45) Mohsenin, N. N. (1970): Physical Properties of Plant and Animal Materials. Volume I. Gordon and Breach Science Publishers, pp. 372, and other.
- 46) O'Brien, M., J. P. Gentry and Gibson, R. C. (1965): Vibrating Characteristics of Fruits as Related to In-Transit Injury. Trans. ASAE., 8(2): 241-243
- 47) 緒方邦安 (1969): 園芸食品の加工と利用, 養賢堂, P158
- 48) Pickett, Gerald (1945): Equations for Computing Elastic Constants from Flexural and Torsional Resonant Frequencies of Vibration of Prisms and Cylinders. Proc. ASTM., 45: 846-865
- 49) Pflug, J. I., F. M. Joffe and R. C. Nicholas (1960): A Mechanical Recording Pressure Tester. Quarterly Bulletin, Michigan Agr. Exp. Sta., 43(1): 117-121
- 50) Rex, L. Clark and P. S. Shackelford (1973): Resonance and Optical Properties of Peaches as Related to Flesh Firmness. Trans. ASAE, 16: 1140-1142
- 51) Richard, C. F. and Esam M. Ahmed (1973): Impact Testing of Fruits and Vegetables. Trans. ASAE, 16: 660-666
- 52) Shelef, L. and N. N. Mohsenin (1967): Evaluation of the Modulus of Elasticity of Wheat Grain. Cereal Chem., 44(4): 393-402
- 53) Shponlyanskaya, A. L. (1952): Structural Mechanical Properties of the Wheat Grain. Colloid Journal

- (English Translation) 14(1): 137-148
- 54) Somers, G. Fred (1966): The Bending of Potato-tuber Slices Mounted as Cantilever Beams. *J. Exp. Botany*, 17(50): 27-33
- 55) Spinner, S. and W. E. Tefft (1961): A method For Determining Mechanical Resonance Frequencies and for Calculating Elastic Moduli from These Frequencies. *ASTM, Proceedings*, 61: 1221-1238
- 56) Stephenson, K. Q., R. K. Byler, M. A. Wittman (1973): Vibrational Response Properties as Sorting Criteria for Tomatoes. *Trans. ASAE*, 16: 258-265
- 57) 田原虎次・藍房和・須藤允・石川文武 (1968): 果菜類の物理的手法による鮮度判定法に関する研究 (第1報), *農機誌*, 30(3): 169-174
- 58) 武田吉弘, 沢路雅夫・安川仁次郎 (1970): 振動特性によるリンゴの熟度非破壊的測定, *日本食品工業学会誌*, 17(8):
- 59) チモシェンコ, S (谷下・渡辺訳) (1971): *工業振動学*, 東京図書, pp 309他
- 60) Tefft, W. E. (1960): Numerical Solution of the Frequency Equations for the Flexural Vibrations of Cylindrical Rods. *J. Res. Nat. Bureau of Standards*, 64 B(4): 237-243
- 61) Timbers, G. E., L. M. Staley and E. L. Watson (1965): Determining Modulus of Elasticity in Agricultural Products by loaded Plungers.
- 62) Timoshenko and Goodier (1970): *Theory of Elasticity*. McGrawhill, 3rd Ed. pp 487
- 63) Virgin, H. I. (1955): A new Method for the Determination of the Turgor of Plant Tissues. *Physiologia Plantarum*, 8: 954-962
- 64) Voisey, Peter W., and McDonald, D. C. (1964): An Instrument for Measuring the Puncture Resistance of Fruits and Vegetables. *Amer. Soc. Hort. Proc.*, 84: 557-563
- 65) Whittenberger, R. T. (1950): Measuring the Firmness of Red Tart Cherries. *Food Tech.*, 4: 311-312
- 66) Whittenberger, R. T. (1951): Measuring the Firmness of Cooked Apple Tissues. *Food Tech.*, 5: 17-20
- 67) Yong, Y. C. and W. K. Bilanski (1979): Modes of Vibration of Spheroidals at the First and Second Resonant Frequencies, *Trans. of ASAE*, 22(6): 1463-1466
- 68) 湯川秀樹・田村松平 (1955): *物理学通論・上巻*, 光明堂
- 69) Zoeb, G. C. and C. W. Hall (1960): Some Mechanical and Rheological Properties of Grains. *J. Agr. Eng. Res.*, 5(1):83-93